

Національна академія наук України
Інститут технічної теплофізики

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

КОНИК АЛІНА ВАСИЛІВНА

УДК 536.421+536.63

ДИСЕРТАЦІЯ

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

05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Науковий консультант:

Андрій Олександрович Авраменко,
член-кореспондент НАН України,
доктор технічних наук, професор

Київ – 2025

АНОТАЦІЯ

Коник А.В. Систем дискретного опалення з застосуванням теплових акумуляторів ємнісного типу – на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – «Технічна теплофізика і промислова теплоенергетика». Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, 2025.

У представленій дисертаційній роботі вирішується науково-прикладна проблема створення теоретичних засад з розробки мобільних систем дискретного опалення. При цьому була вирішена нагальна задача виготовлення мобільного теплового акумулятора, який необхідний при виникненні надзвичайних та аварійних ситуацій в умовах бойових дій для забезпечення теплом інфраструктурних, військових та побутових споживачів. При виконанні роботи було прийнято низку технічних рішень, що ґрунтуються на теоретичних і експериментальних даних отриманих при вирішення поставлених задач.

Основним елементом мобільного теплового акумулятора є акумуляційна ємність яка реалізує акумуляційний процес з застосуванням трьох робочих тіл – це теплоакумулююча рідина, матеріал з фазовим переходом і вода, що застосовується у якості теплоносія. Для дослідження процесів гідродинаміки і тепломасообміну було проведено математичне моделювання стаціонарного і нестаціонарного комплексного теплообміну при плівковому кипінні, де застосовували метод симетрії, також здійснено моделювання осцилюючого потоку в пористому середовищі.

Для створення теплоакумулюючої рідини було проведено комплексні експериментальні дослідження вибору складових, дослідження їх теплофізичних властивостей в робочих температурних режимах мобільного теплового акумулятору. Досліджено зміни їх теплофізичних характеристик в процесі їх експлуатації. Визначено термін його застосування. Для валідації

отриманих результатів було застосовано дворівневу модель з застосуванням методів молекулярної динаміки та дисипативних часток.

Для вибору матеріалу з фазовим переходом, що використано у «тепловому ядрі» для подолання теплової стратифікації яка виникає по висоті акумуляційної ємності, було відібрано природні вибухо- і пожежобезпечні, економічно доцільні матеріали з фазовим переходом в межах робочих температур мобільного теплового акумулятору. Досліджено їх питому теплоємність та теплоту фазового переходу та їх зміни в процесі термоциклування. Проведено аналітичне моделювання теплових процесів у «тепловому ядрі» та отримано значення теплоємності та ентальпії аналітичним шляхом. Отримано високу узгоджуваність експериментальних і теоретичних даних.

Отримані аналітичним і експериментальним шляхом результати досліджень було покладено в основу створення конструкції мобільного теплового акумулятору МТА-0,5МВт. Розроблено відповідну робочу конструкторську документацію, створено дослідний зразок МТА-0,5МВт.

Проведено натурні та дослідно-експлуатаційні дослідження створеного дослідного зразка МТА-0,5МВт в результаті яких отримано технічні характеристики. Реалізовано апробацію стаціонарної роботи дослідного зразка МТА-0,5МВт за реальних умов протягом чотирьох опалювальних сезонів на двох локаціях.

Дисертація має структуру завершеної науково-дослідної роботи. Текст дисертації складається зі вступу, семи розділів, висновків, переліку використаних джерел з 235 найменувань та додатків. Загальний об'єм дисертаційної роботи складає 386 сторінок машинописного тексту. Робота містить 105 рисунка та 20 таблиці.

У *вступі* стисло обґрунтовано стан наукової проблеми, актуальність і важливість значення дисертаційної роботи, визначено її зв'язок з науковими темами, програмами і планами, сформульовано мету роботи та поставлено конкретні задачі досліджень, наведено наукову новизну та практичну цінність

отриманих результатів. Наведено дані про апробацію результатів дисертаційної роботи. Зазначено дані про особистий внесок автора, опубліковані результати, структуру та об'єм дисертаційної роботи.

У *першому* розділі наведено огляд систем теплопостачання, а саме приведено матеріали про розвиток сучасних систем теплопостачання, зазначено важливість доставки теплової енергії альтернативними способами за допомогою мобільних теплових акумуляторів. Проведено огляд мобільних систем накопичення теплової енергії, їх технічні характеристики та роль в системах теплопостачання. Зазначено важливість і основні критерії вибору теплоакumuлюючих рідин, що застосовуються в мобільних теплових акумуляторах. Представлено концепцію дискретної системи опалення, зазначено її переваги та актуальність застосування під час ведення бойових дій і надзвичайних ситуацій.

На основі опрацювання літературних джерел, було визначено мету даної роботи та основні задачі, що в ній вирішуються.

У *другому розділі* наведено огляд методів математичного моделювання, що було застосовано при вирішенні задач теплоомасообмінних та гідродинамічних процесів при тепловому акумулюванні.

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

Метод ґрат Больцмана застосовували при моделюванні осцилюючого потоку в пористому середовищі в пласкому і циліндричному каналах для верифікації з даними отриманими аналітичним шляхом.

Метод молекулярної динаміки і метод дисипативних часток застосовано для створення дворівневої моделі при моделюванні взаємодії між частинками теплоакumuлюючої рідини. Метод молекулярної динаміки враховує сили взаємодії між частками, а метод дисипативної динаміки часток вирішує проблему у співвідношеннях між розмірами часток.

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

При моделюванні процесів теплообміну всередині «теплового ядра» заповненого теплоакумуючим матеріалом з фазовим переходом (далі РСМ) виведено рівняння нагрівання охолодженого всередині теплової вставки матеріалу, отримано аналітичні залежності теплоємності РСМ від температури. Проведено аналіз тестових результатів розрахунку по моделі і співставлено з даними отриманими експериментальним шляхом. Одержано температурні режими роботи ємнісних теплових кумуляторів.

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. Показано вплив випромінювання та різниці температур між стінкою та рідиною на профілі температури в паровій плівці. В результаті вирішення нестаціонарної задачі отримано залежну від часу зміну профілю температури та коефіцієнта тепловіддачі в паровій плівці. Показано вплив випромінювання (числа Старка) на коефіцієнт тепловіддачі. Збільшення радіаційного теплового потоку призводить до збільшення числа Нуссельта і часу, за який процес теплопередачі виходить на стаціонарний режим. В результаті моделювання одержано обмежуючі температурні режими теплових акумуляторів.

Проведено моделювання осцилюючого потоку в пористому середовищі, було розроблено нестаціонарну модель осцилюючого потоку рідини в пористому середовищі у плоских та циліндричних каналах, що дозволяє оцінити вплив осциляцій на гідродинаміку потоку теплоносія. Встановлено що зі збільшенням значення частоти (числа Струхалія) 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.

Четвертий розділ присвячено створенню теплоакumuлюючої рідини, що застосовано у теплових акумуляторах ємнісного типу у якості «робочого тіла». Описано властивості багатофункціональних порошків, що використано для приготування теплоакumuлюючої рідини. Проведено комплексні експериментальні дослідження з урахуванням співвідношення енергетичних витрат до часу акумуляції різних за складом теплоакumuлюючих рідин. Описано експериментальні стенди та методики вимірювань.

Проведено дослідження теплофізичних параметрів теплоакumuлюючої рідини в діапазоні температур від 30 до 120°C при термоцикуванні (цикл - нагрів/охолодження). Встановлено строк експлуатації теплоакumuлюючої рідини.

Запропоновано схему мобільного технологічного комплексу для приготування теплоакumuлюючої рідини.

У **п'ятому розділі** представлено результати моделювання процесів динаміки формування просторових наноструктур у теплоакumuлюючій рідині з застосуванням дворівневої моделі створеної на основі методів молекулярної динаміки та дисипативних часток.

У **шостому розділі** проведено вибір матеріалу з фазовим переходом з метою застосування в «тепловому ядрі» та проведено дослідження теплофізичних властивостей обраних зразків. Також, досліджено теплоакumuлюючу здатності матеріалу з фазовим переходом при термоцикуванні.

У **сьомому розділі** представлено дослідження акумуляції теплової енергії на основі створеного дослідного зразка мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт. А саме, розроблення робочої конструкторської документації призначеної для виготовлення та випробування дослідного зразка МТА. Приведено опис загальної та технологічної схеми МТА та проектування блочного індивідуального теплового пункту. Зазначено схему моніторингу температурних показників, теплової енергії та інших технічних параметрів автоматичної системи мобільного теплового акумулятора на базі

спеціалізованого контролеру типу GSM-сигналізація "ОКО-PRO-X", що встановлений в індивідуальному тепловому пункті. Також описано схему підключення мобільного теплового акумулятора до споживача та джерела.

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

Проведено визначення основних параметрів ємності акумулятора та розрахунок теплових навантажень МТА. Визначено конструктивні особливості акумулятора ємнісного типу, запропоновано два типи матеріалів з фазовим переходом для подолання теплової стратифікації, що виникає по висоті акумуляційних ємностей. Приведено розрахунок напружено-деформованого стану на міцність акумуляційної ємності при транспортуванні.

В узагальнюючих **висновках** наводиться перелік основних наукових і практичних результатів, одержаних у дисертаційній роботі.

Наукова новизна роботи:

1. Вперше сформульовано теоретичні підходи на основі проведеного аналітичного та чисельного моделювання тепломасообмінних та гідродинамічних процесів мобільного теплового акумуляування 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 нестаціонарної 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 по-жежобезпечної теплоакумуючої 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 теплоакумуючої рідини.

Практичне значення отриманих результатів:

1. 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).

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

3. Оптимізовано конструкцію ємнісного акумулятора в якій застосовано три робочих тіла – теплоносії (вода), нова композиція теплоакumuлюючої рідини та матеріал з фазовим переходом, що дозволило підвищити теплову акумуляцію і подолати теплову стратифікацію по висоті ємності.

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

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

6. 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».

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

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:

1. Konyk A.V., Demchenko V.V. 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, Poland. ISBN 978-83-66678-08-8. p.68-71. *(Особистий внесок здобувача – співавторство наведених положень)*

2. Демченко В.Г., Коник А.В. Техніко-економічне обґрунтування впровадження Дискретної системи постачання теплоти та холоду. Матеріали конференції. Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: Сборник трудов / Институт промышленной экологии. – К. : ИПЦ АЛКОН НАНУ, 2021, с. 178 – 181. . *(Особистий внесок здобувача – співавторство наведених положень та результатів досліджень)*

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

4. Демченко В.Г., Коник А.В. Фалько В.Ю Стенди та методика проведення досліджень термоцикування матеріалів з фазовим переходом різної в'язкості. Збірник тез доповідей XXII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених ”Ресурс-енергозберігаючі технології та обладнання” 24-26 травня 2022 р. м. Київ / Укладач Я.М. Корнієнко. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2022. с. 54-61. *(Особистий внесок здобувача – співавторство наведених положень)*

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

6. Demchenko V.G., Konyk A.V. Mobile thermal energy storage (M-TES). Матеріали міжнародної конференції. Actual problems of renewable energy, construction and environmental engineering. Book of abstracts. 24-27 November 2022 Faculty of Environmental, Geomatic and Energy Engineering Kielce University of Technology, Poland, pp.41-44. *(Особистий внесок здобувача – співавторство наведених положень)*

7. Коник А.В., Хоменко М.В. 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. м. Київ. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2022 с. 17-20. *(Особистий внесок здобувача – співавторство наведених положень)*

8. Коник А.В., Хоменко М.В. 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. м. Київ / Укладач Я.М. Корнієнко. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2023. с. 128-135. *(Особистий внесок здобувача – співавторство наведених положень)*

9. Демченко В.Г., Коник А.В., Хоменко М.В. Огляд і обґрунтування вибору теплоаккумуляційного 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. м. Київ. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2023. с.136-141. *(Особистий внесок здобувача – співавторство наведених положень та результатів досліджень)*

10. Демченко В.Г., Коник А.В., Хоменко М.В. Використання теплових акумуляторів у відновлювальній енергетиці України. Матеріали конференції. Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XXIV міжнародної науково-практичної конференції. Київ, 18–19 травня

2023р.– К.: Інституту відновлюваної енергетики НАН України. с. 181-183.
<https://doi.org/10.36296/renewable.conf.18-19.05.2023>. *(Особистий внесок здобувача – співавторство наведених положень)*

11. Коник А.В., Хоменко М.В. 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. м. Київ. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2023. с. 152-155. *(Особистий внесок здобувача – співавторство наведених положень)*

12. Коник А.В., Іванов С.О. Дослідження питомої теплоємності теплоакumuляційного 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. м. Київ / Укладач Я.М. Корнієнко. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2023. с.112-116. *(Особистий внесок здобувача – співавторство наведених положень та результатів досліджень)*

13. Основи застосування методу молекулярної динаміки при моделюванні теплоакumuляційного матеріалу. 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», 132-136.

14. Демченко В.Г., Коник А.В. 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)*

15. Дослідження мікроструктури теплоакumuляційного матеріалу. XX міжнародна наукова конференція «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв», 9-13 вересня 2024 р., м. Одеса, Україна, с. 6-7.

Перелік публікацій:

Статті у фахових виданнях України:

1. Ivanitsky G.K., Konyk A.V., Stepaniuk A.R., Demchenko V.G. Моделювання процесів теплообміну в «тепловому ядрі» заповненого теплоакumuляційним матеріалом. eBook Energy Technologies & Resource Saving. 2023.- с.58-70. **SCOPUS** (*Особистий внесок здобувача полягає в постановці проблеми, проведенні аналітичних і експериментальних досліджень, аналізі отриманих результатів*).

2. Демченко В.Г., Трубачев А.С., Коник А.В. Дослідження напружено-деформованого стану елементів мобільного теплового акумулятора. Теплофізика та теплоенергетика, 2020, Т. 42, №2 , с. 68-75. Фахове видання категорія Б (*Особистий внесок здобувача полягає в постановці задачі досліджень напружено-деформованого стану та аналізі отриманих даних*).

3. Демченко В.Г., Коник А.В. Основні аспекти процесів теплоакumuлювання. Одеса «Наукові праці», 2020. – Випуск 1 Том 84, с. 48-53. DOI <https://doi.org/10.15673/swonaft.v84i1.1868> Фахове видання категорія Б (*Особистий внесок здобувача полягає в проведенні аналізу основних технічних і технологічних та конструктивних особливостей теплових акумуляторів*).

4. Демченко В.Г., Коник А.В. Зменшення непродуктивних теплових втрат при генерації енергії. Вісник Національного технічного університету: Серія «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування», м. Харків, № 1(3) 2020, с. 30 – 34. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2020.01.05> Фахове видання категорія Б (*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., Коник А.В., Хоменко М.В. Дослідження теплових характеристик електричних опалювальних приладів. Теплофізика та теплоенергетика, 2021, Т. 43, №2, с. 41-49. <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2021.5> Фахове видання категорія Б (Особистий внесок здобувача полягає в постановці задачі досліджень, обробці і аналізі отриманих результатів, та наданні рекомендацій стосовно ефективності застосування опалювальних приладів).

6. Демченко В.Г., Коник А.В., Фалько В.Ю. Мобільні теплові акумулятори. Вісник Національного технічного університету: Серія «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування», м. Харків, № 1(3) 2020, с. 30 – 34. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2021.03.06> Фахове видання категорія Б (Особистий внесок здобувача полягає в постановці задачі, огляді технічних й технологічних аспектів застосування мобільних теплових акумуляторів).

7. Демченко В.Г., Коник А.В., Погорєлова Н.Д. Розробки з підвищення ефективності теплопостачання в теплоенергетиці. Теплофізика та теплоенергетика, 2022, Т. 44, №3, с. 73-83. DOI <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2022.7> Фахове видання категорія Б (Особистий внесок здобувача полягає в проведенні дослідницької роботи щодо застосування МТА-0,5МВт, створенні і дослідженні теплофізичних характеристик теплоакumuлюючої рідини).

8. Демченко В.Г., Коник А.В., Хоменко М.В. Мобільний технологічний комплекс для приготування водорозчинних полімерів. Scientific Works, ISSN-print: 2073-8730, ISSN-online: ISO: 26324:2012 DOI <https://doi.org/10.15673/swonaft.v86i1.2414> Фахове видання категорія Б (Особистий внесок здобувача полягає в формуванні технологічного процесу змішування/розчинення водорозчинних полімерів при створенні теплоакumuлюючої рідини).

9. Демченко В.Г., Коник А.В., Погорєлова Н.Д., Хоменко М.В. Розрахунок об'ємної втрати природного газу через нещільності з'єднань в трубопроводі. Теплофізика та теплоенергетика, 2024, Т. 46, №1, с. 58-65. DOI <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2024.8> Фахове видання категорія Б (*Особистий внесок здобувача полягає в постановці проблеми і аналізі можливих втрат*)

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

Патенти:

11. Демченко В.Г., Коник А.В. Акумулятор ємнісного типу. Патент Україна на винахід. Патент 126579 Опубліковано 02.11.2022, МПК: F24H7/02 F24D15/02. Заявки а201911450 (*Особистий внесок здобувача полягає в проведенні аналізу конструкцій теплових акумуляторів та розробці і верифікації нової конструкції*).

12. Демченко В.Г., Коник А.В., Фалько В.Ю. Акумуляційна рідина для систем опалення та охолодження. Патент Україна на винахід. Патент на винахід № 128359. Опубліковано 19.06.2024, Бюл. №25, МПК (2024.01) C09K 5/00, C09K 5/20 (2006.01), C23F 11/00 (*Особистий внесок здобувача полягає в постановці задачі досліджень, вибір компонент теплоаккумуляційного матеріалу, проведення експериментальних досліджень, аналіз отриманих результатів і визначення концентрації основних компонент*).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

13. Демченко В.Г., Коник А.В., Макаренко Л.А. Енергетика України на сьогоднішній день. Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики. Збірник праць під редакцією О. І. Сігала, Київ, с. 27-30. (*Особистий внесок*

здобувача полягає в проведенні огляду стану енергетики України на початку військових дій та перспективи розвитку).

14. Смерницький Д.В., Демченко В.Г., Коник А.В., Рябий С.М., Марченко О.Г., Жванко Ю. П. Багатофункціональний транспортабельний теплоаккумулятор ємнісного типу. Актуальність та доцільність використання в підрозділах системи МВС. Сучасна спеціальна техніка, 2023. № 1. – С. 153-160, ISSN 2411-3816 (*Особистий внесок здобувача полягає в розробці технологічних засад і конструктивних особливостей застосування мобільного теплового акумулятора*).

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

15. Demchenko V., Konyk A., Dekusha O. Thermal Energy Storage Systems in the District Heating Systems. Book: Systems, Decision and Control in Energy V. p. 371-384. DOI : 10.1007/978-3-031-35088-7. eBook. ISBN 978-3-031-35088-7. Print ISBN 978-3-031-35087-0. Springer. **SCOPUS** (*Особистий внесок здобувача полягає в проведенні аналізу літературних джерел стосовно методів і способів акумуляції, постановки проблеми, вибору методу акумуляції для ємнісного обладнання*).

16. Konyk A., Demchenko V. Integration of heat storage technologies in district heating systems. Rocznik Ochrona Srodowiska, Poland, 06.12.2021, pp. 493-502, ISSN 1506-218X eBook. <https://doi.org/10.54740/ros.2021.034> ISSN, 1506-218X. **SCOPUS** (*Особистий внесок здобувача полягає в проведенні аналізу літературних джерел, можливість і перспективи застосування мобільного теплового акумулятору МТА-0,5МВт*).

17. Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Kovetskaya M.M., Kovetska Y.Y., Konyk A.V. Steady and Unsteady Complex Heat Transfer in Optically Thick Medium During Film Boiling. ASME Journal of Heat and Mass Transfer, 2024-03-01. DOI: 10.1115/1.4064274, ISSN: 2832-8450, ISSN: 2832-8469. **SCOPUS Q1**

(Особистий внесок здобувача полягає в постановці проблеми, проведенні аналітичних досліджень та аналізі отриманих результатів).

18. Avramenko A.A., Tyrinov A.I., Kovetska Yu.Yu, Konyk A.V. Oscillating flow of viscous electron fluids. Chinese Journal of Physics, 2024-02. DOI: 10.1016/j.cjph.2023.12.010. **SCOPUS Q2** *(Особистий внесок здобувача полягає в постановці проблеми, проведенні аналітичних та чисельних розрахунків, аналізі отриманих результатів).*

19. Demchenko V., Konyk A.V., Dekusha H. Determination of components for heat storage material. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 1254, 4th International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technology, Social and Economic Matters (ICSF-2023) 22/05/2023 - 26/05/2023 Кривий Ріг, Україна DOI 10.1088/1755-1315/1254/1/012033. **SCOPUS** *(Особистий внесок здобувача полягає в постановці задачі досліджень, виборі методик досліджень, проведенні експериментальних досліджень та аналізі отриманих результатів).*

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

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

22. Demchenko V.G., Konyk A.V. Research of heat accumulation capacity binary water systems. <http://www.iosrjournals.org/iosr-jac.html>. <https://doi.org/10.9790/5736-1306010107> Фахове іноземне видання *(Особистий внесок здобувача полягає в постановці задачі досліджень, проведенні експериментальних досліджень, аналіз і обробка отриманих результатів).*

23. Konyk A.V., Demchenko V.V. Integration of heat storage technologies in central heating systems. JNTES, Poland, pp.3-10. DOI: 10.53412/jntes-2021-1.1
Фахове іноземне видання (*Особистий внесок здобувача полягає в постановці задачі інтегрування мобільних теплових акумуляторів в загальну енергетичну систем*)
24. Demchenko V.G., Konyk A.V. Mobile thermal energy storage (M-TES). JNTES, Poland, pp.91-96 Doi: 10.53412/jntes-2022-3-2 Фахове іноземне видання (*Особистий внесок здобувача полягає в проведенні огляду світового досвіду створення мобільних теплових акумуляторів та створенні нової конструкції МТА-0,5МВт*).
25. Avramenko A., Shevchuk I., Kovetskaya M, Kovetska Y., Konyk A. 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*).

ANNOTATION

Konyk A.V. 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, 2025.

This dissertation addresses the scientific and applied problem of creating a theoretical foundation for the development of mobile discrete heating systems. It also addresses the urgent need to manufacture a mobile thermal energy storage, essential in emergency and combat situations to provide heat to infrastructure, military, and domestic consumers. When performing the work, a number of technical solutions were made, based on theoretical and experimental data obtained when solving the tasks.

The main element of the mobile thermal energy storage (M-TES) is the storage tank, which implements the storage process using three working bodies – a heat storage fluid, a phase change material (PCM), and water, which is used as a heat carrier. To study the processes of hydrodynamics and heat and mass transfer, a mathematical modeling of stationary and non-stationary complex heat transfer was carried out, where symmetry method was used for film boiling, and modeling of oscillating flow in a porous medium was carried out as well.

To create a heat storage material, comprehensive experimental studies were conducted on the selection of components, the study of their thermophysical properties in the operating temperature regimes of a mobile thermal energy storage. Changes in their thermophysical characteristics during their operation were studied. The term of its use was determined. To validate the obtained results, a two-level model was applied using molecular dynamics (MD) and dissipative particle (DPD) methods.

To select a phase change material used in the “thermal core” to overcome thermal stratification that occurs along the height of the storage tank, natural

explosion- and fire-safe, economically feasible materials with a phase transition within the operating temperatures of the mobile thermal energy storage were selected. Their specific heat capacity, heat of phase transition and their changes during thermal cycling were investigated. Analytical modeling of thermal processes in the “thermal core” was carried out and the values of heat capacity and enthalpy were obtained analytically. High agreement between experimental and theoretical data was obtained.

The research results obtained through analytical and experimental methods were used as the basis for creating the design of the mobile thermal energy storage M-TES 0,5MW. The corresponding working design documentation was developed, and a prototype of M-TES 0,5 MW was created.

Field studies of the created prototype M-TES 0,5 MW were conducted, as a result of which technical characteristics were obtained. Standard operation of the prototype M-TES 0,5 MW was tested under real conditions during four heating seasons at two locations.

The thesis has the structure of a completed research work. The text of the dissertation consists of an introduction, seven chapters, conclusions, a list of sources used with 235 titles and appendices. The total volume of the doctoral thesis is 386 pages of typewritten text. The work contains 105 figures and 20 tables.

The introduction briefly substantiates the state of the scientific problem, the relevance and importance of the doctoral thesis, defines its connection with scientific topics, programs and plans, formulates the goals of the thesis and sets specific research tasks and presents scientific novelty and practical value of the results obtained. Data on the testing of the results of the thesis are provided. Data on the author's personal contribution, published results, structure and volume of the dissertation work are indicated.

The **first section** presents an overview of heat supply systems, namely, materials on the development of modern heat supply systems are provided, the importance of delivering thermal energy by alternative methods using mobile thermal energy storage is noted. A review of mobile thermal energy storage systems,

their technical characteristics and role in heat supply systems is conducted. The importance and main criteria for selecting heat storage fluids used in mobile thermal energy storage are noted. The concept of a discrete heating system is presented, its advantages and relevance for use during combat operations and emergencies are noted.

Based on the analysis of literary sources, the purpose of this thesis and the main tasks to be solved in it were determined.

The **second section** provides an overview of mathematical modeling methods that were applied in solving problems of heat and mass transfer and hydrodynamic processes in thermal storage.

When solving the problems of steady-state and unsteady complex heat transfer during film boiling, the symmetry method was used: in the absence of mechanical interaction at the vapor-liquid interface (Bromley model) and the liquid at rest outside the vapor film (Ellion model).

The lattice Boltzmann method was used to simulate oscillating flow in a porous medium in flat and cylindrical channels for verification with data obtained analytically.

The molecular dynamics method and the dissipative particle method were used to create a two-level model for modeling the interaction between particles of a heat storage fluid. The molecular dynamics method takes into account the forces of interaction between particles, and the dissipative particle dynamics method solves the problem of the ratios between particle sizes.

The **third section** presents the results of modeling the heat and mass transfer and hydrodynamic processes of mobile thermal storage.

When modeling heat exchange processes inside a "thermal core" filled with a heat-accumulating material with a phase change material (PCM), the heating equation of the material cooled inside the thermal insert was derived, and analytical dependences of the PCM heat capacity on temperature were obtained. The test results of the calculation using the model were analyzed and compared with the data

obtained experimentally. The temperature parameters of operation of capacitive thermal energy storage were obtained.

When modeling the processes of heat and mass transfer and hydrodynamics in thermal energy storage, the theory of radiative-convective heat transfer during film boiling of a liquid on a vertical heated surface in stationary and non-stationary parameters was developed. The influence of radiation and the temperature difference between the wall and the liquid on the temperature profile in the vapor film is shown. As a result of solving the non-stationary task, a time-dependent change in the temperature profile and heat transfer coefficient in the vapor film was obtained. The influence of radiation (Stark number) on the heat transfer coefficient is shown. An increase in the radiation heat flux leads to an increase in the Nusselt number and the time for which the heat transfer process reaches a stationary mode. As a result of the modeling, limiting temperature parameters of thermal energy storage were obtained.

The modeling of the oscillating flow in a porous medium was carried out, a non-stationary model of the oscillating fluid flow in a porous medium in flat and cylindrical channels was developed, which allows to assess the influence of oscillations on the hydrodynamics of the coolant flow. It was established that with an increase in the frequency value (Strouhal number) in flat and circular channels, the maximum of the particle flow averaged over the period of oscillations shifts from the center to the periphery. The obtained results of analytical and numerical modeling are in fairly good agreement.

The **fourth section** is devoted to the creation of a heat storage fluid, which is used in capacitive-type thermal energy storage as a “working mass”. The properties of multifunctional powders used to prepare the heat storage fluid are described. Comprehensive experimental studies was conducted taking into account the ratio of energy consumption to the accumulation time of heat storage fluids of different composition. Experimental stands and measurement methods are described.

The thermophysical parameters of the heat storage fluid were studied in the temperature range from 30 to 120°C during thermal cycling (heating/cooling cycle). The service life of the heat storage fluid was established.

A scheme of a mobile technological complex for the preparation of heat-accumulating fluid is proposed.

The **fifth section** presents the results of modeling the dynamics of the formation of spatial nanostructures in a heat-storage fluid using a two-level model created on the basis of molecular dynamics and dissipative particle methods.

In the **sixth section**, a phase change material was selected for use in the "thermal core" and the thermophysical properties of the selected samples were studied. The heat storage capacity of the phase change material during thermal cycling was also investigated.

The **seventh section** presents a study of thermal energy accumulation based on the created prototype of the mobile thermal energy storage M-TES 0,5 MW. Namely, the development of working design documentation intended for the manufacture and testing of the prototype of the M-TES. A description of the general and technological scheme of the M-TES and the design of a block individual thermal point are given. A scheme for monitoring temperature indicators, thermal energy and other technical parameters of the automatic system of the mobile thermal energy storage based on a specialized controller of the GSM-alarm type "OKO-PRO-X", which is installed in an individual thermal point, is indicated. The scheme for connecting the mobile thermal energy storage to the consumer and the source is also described.

Calculations and results of experimental studies are presented to determine the operating parameters and structural dimensions of the M-TES, thermal and hydraulic calculation of the M-TES, and the rate of charge and discharge of thermal accumulators.

The main parameters of the thermal energy storage capacity and the calculation of the thermal loads of the M-TES were calculated. The design features of the capacitive type thermal energy storage were determined, two types of

materials with a phase change materials were proposed to overcome the thermal stratification that occurs along the height of the storage tanks. The calculation of the stress-strain state on the strength of the storage tank during transportation was given.

The general conclusions provide a list of the main scientific and practical results obtained in the dissertation work.

Scientific novelty:

1. For the first time, theoretical approaches have been formulated based on the conducted analytical and numerical modeling of heat and mass transfer and hydrodynamic processes of mobile thermal storage for optimizing the design of a mobile thermal accumulator, namely:

- for the first time, the heat transfer process inside the "thermal core" filled with a material with a phase transition has been analytically investigated;

- the theory of radiation-convective heat transfer during film boiling of a liquid near a vertical heated plate has been developed. The stationary and unsteady heat transfer problems have been investigated, taking into account that the latter describes the instantaneous (explosive) boiling of a liquid on a heated surface. For the first time, an analytical solution of the stationary mode problems has been obtained for boundary conditions with a constant wall temperature and a constant heat flux through the wall. As a result of solving the non-stationary problem, changes in temperature profiles and heat transfer coefficient in the vapor film have been obtained depending on time. The influence of radiation (Stark number) on the heat transfer coefficient has been shown;

- a non-stationary model of oscillating fluid flow in flat and cylindrical channels with a porous medium has been developed. The analytical data have been compared with the numerical results obtained using the Boltzmann lattice method. It has been shown that the behavior of the oscillating fluid flow under the influence of an oscillating pressure gradient is determined by two dimensionless parameters – the Strouhal and Darcy numbers.

2. For the first time, the thermophysical properties of the newly created explosion- and fire-safe heat-accumulating fluid based on water-soluble polymers has been investigated during the use of four heating seasons, namely, specific heat capacity, thermocycling, density and hydrogen index.

3. For the first time, a combined model combining molecular dynamics and dissipative particle dynamics has been used to simulate the interaction of particles of a heat-accumulating fluid.

Practical significance of the results obtained:

1. Based on the results of mathematical modeling and comprehensive experimental research, a discrete heating system was created using a prototype of a mobile thermal accumulator. The discrete heating system was used for the first time during emergency shutdowns at the Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, 2a M. Kapnist St.) and Medical Rehabilitation Center of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine «Kremintsi» (Tatariv village, Ivano-Frankivsk region).

2. A prototype of a mobile thermal accumulator MTA-0.5MW was created, the use of which allowed to ensure a stable heat supply to the building of the Medical Rehabilitation Center of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine "Kremintsi" and save 2700 kWh (13867 UAH in monetary equivalent) for the heating period 2022-2023.

3. The design of the capacitive accumulator was optimized, in which three working bodies were used, namely, a coolant (water), a new composition of the heat-accumulating liquid and a material with a phase transition, which allowed to increase heat accumulation and overcome thermal stratification along the height of the container.

4. Based on the results of mathematical modeling and comprehensive experimental research, a new explosion- and fire-resistant composition of the heat-accumulating fluid was created and applied, and a material with a phase transition (melting / solidification) was selected in accordance with the temperature parameters

of the mobile heat accumulator, made it possible to increase the heat accumulation to 56% in M-TES-0.5MW.

5. A new composition of the heat-accumulating fluid was created based on water-soluble polymers of natural origin and its thermophysical parameters were experimentally studied, which allowed to extend its service life to at least 2-4 years.

6. The results of mathematical modeling of heat-mass exchange and hydrodynamic processes of mobile heat accumulation were used in the development of methods for bachelor's and master's educational programs of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

Key words: thermal storage, mobile thermal energy storage, thermal storage liquid, phase change material, thermophysical properties.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	32
ВСТУП	35
РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ МОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУВАННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ .	45
1.1. Сучасний стан систем теплопостачання у світі та Україні. Застосу- вання мобільних теплових акумуляторів.	45
1.2. Аналіз застосування мобільних систем накопичення теплової енергії в системах теплопостачання. Основні обмежуючі параметри застосування M-TES	48
1.3. Застосування теплоакумулюючих рідин і матеріалів з фазовим переходом в мобільних теплових акумуляторах.	54
1.4. Теплові акумулятори ємнісного типу.	59
1.5. Мета і задачі досліджень	62
РОЗДІЛ 2. ОГЛЯД МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ	65
2.1. Метод симетрії	65
2.2. Метод ґраток Больцмана	69
2.3. Метод молекулярної динаміки	76
2.4. Метод дисипативних часток	83
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ ТА ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ МОБІЛЬНОГО ТЕПЛОВОГО АКУМУЛЮВАННЯ	85
3.1. Моделювання процесів теплообміну всередині «теплового ядра» заповненого матеріалом з фазовим переходом	85
3.1.1. Розділення труби на поздовжні кільцеві зони	88
3.1.2. Виведення рівняння нагрівання охолодженого РСМ всередині «теплового ядра»	89

3.1.2.1. Радіальне перенесення теплоти в будь-якій i -й зоні окрім першої та останньої	92
3.1.2.2. Радіальне перенесення тепла в першій елементарній зоні ($i=1$)	92
3.1.2.3. Радіальне перенесення тепла в останній елементарній ($i=N$)	94
3.1.3. Аналітичні залежності теплоємності РСМ від температури:	95
3.1.4. Аналіз тестових результатів розрахунку по моделі	101
3.2. Стаціонарний і нестаціонарний комплексний теплообмін при плівковому кипінні	103
3.2.1. Математична модель	103
3.2.2. Проблема стаціонарного стану	105
3.2.2.1. Модель Бромлі (відсутня механічна взаємодія на межі пара-рідина)	108
3.2.2.2. Модель Елліона (рідина в стані спокою поза паровою плівкою)	114
3.2.3. Проблема нестаціонарності	115
3.3. Моделювання осцилюючого потоку в пористому середовищі	123
3.3.1. Осцилюючий потік у пласкому каналі	123
3.3.2. Осцилюючий потік у циліндричному каналі	126
Висновки за розділом 3.	135
РОЗДІЛ 4. СТВОРЕННЯ ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧОЇ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЇЇ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ	137
4.1. Вибір основних складових теплоакумуючої рідини на основі експериментальних досліджень співвідношення енергетичних витрат до часу акумуляції	137
4.1.1. Хімічні та фізичні властивості багатофункціональних порошків та антифризу	138
4.1.2. Експериментальні стенди. Методики досліджень та приведення вимірювань.	142

4.2. Дослідження теплофізичних параметрів теплоакumuлюючої рідини на основі водорозчинних високомолекулярних вуглеводнів рослинного походження	156
4.2.1. Дослідження швидкості нагріву/охолодження теплоакumuлюючої рідини при розташування в ємності та циркуляції в діапазоні температур від 30 до 120°C.	156
4.2.2. Дослідження зміни теплоємності теплоакumuлюючої рідини.	167
4.2.3. Дослідження водневого показника теплоакumuлюючої рідини при зміні температури	168
4.2.4. Дослідження густини теплоакumuлюючої рідини при зміні температури	171
4.3. Технічні характеристики теплоакumuлюючої рідини	172
4.4. Створення технології приготування теплоакumuлюючої рідини. Мобільний технологічний комплекс.	173
Висновки за розділом 4	180
РОЗДІЛ 5. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ДИНАМІКИ ФОРМУВАННЯ ПРОСТОРОВИХ НАНОСТРУКТУР	183
5.1. Математична модель	183
5.2. Особливості реалізації дворівневої моделі	185
5.3. Результати моделювання	188
Висновки за розділом 5.	192
РОЗДІЛ 6. ВИБІР І ЗАСТОСУВАННЯ В МАТЕРІАЛУ З ФАЗОВИМ ПЕРЕХОДОМ В ЄМНІСНИХ ТЕПЛОВИХ АКУМУЛЯТОРАХ	193
6.1. Вибір матеріалу з фазовим переходом для застосування ємнісних акумуляторів мобільного теплового акумулятору МТА-0,5МВт	193
6.2. Дослідження теплофізичних властивостей матеріалів з фазовим переходом	200
6.3. Дослідження теплоакumuляційної здатності матеріалу з	

фазовим переходом при термоциклуванні	204
Висновки за розділом 6	209
РОЗДІЛ 7. ДОСЛІДЖЕННЯ АКУМУЛЯЦІЇ ТЕПЛОВОЇ	
ЕНЕРГІЇ СТВОРЕНОГО ДОСЛІДНОГО ЗРАЗКА	
МОБІЛЬНОГО ТЕПЛОВОГО АКУМУЛЯТОРА. ДИСКРЕТНА	
СИСТЕМА ОПАЛЕННЯ	211
7.1. Секція акумуляції. Оптимізація конструкції теплового акумулятора ємнісного типу	211
7.1.1. Визначення основних параметрів ємності аккумулятора	211
7.1.2. Розташування матеріалу з фазовим переходом в тепловому ємнісного типу	214
7.1.3. Розрахунок напружено-деформованого стану на міцність ємності теплового аккумулятора при транспортуванні	219
7.1.3.1. Методика проведення розрахунку напружено-деформованого стану	220
7.1.3.2. Результати розрахунку напружено-деформованого стану ємності теплового аккумулятора	224
7.2. Мобільний тепловий акумулятор. Розроблення робочої конструкторської документації призначеної для виготовлення та випробування дослідного зразка МТА -0,5МВт	227
7.2.1. Загальний опис та технологічна схема мобільного т еплового аккумулятора МТА-0,5МВт	227
7.2.2. Проектування та виготовлення блочного індивідуального теплового пункту МТА-0,5МВт	235
7.2.3. Моніторинг основних робочих параметрів автоматичної системи моніторингу мобільного теплового аккумулятора на базі спеціалізованого контролеру типу GSM-сигналізації "ОКО-PRO-X"	238
7.2.4. Схема підключення мобільного теплового аккумулятора МТА-0,5МВт до споживача і джерела	245

7.3. Визначення параметрів роботи дослідного зразка мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт	248
7.3.1. Теплове навантаження мобільного теплового акумулятору	
МТА-0,5МВт	248
7.3.1.1 Швидкість заряду та розряду теплового акумулятору	
МТА-0,5МВт	248
7.3.1.2. Розрахунок теплового навантаження системи акумуляції .	251
7.3.2. Дослідження акумуляційної здатності мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт	255
7.3.3. Визначення теплових втрат дослідного зразка мобільного теплового акумулятору МТА-0,5МВт	261
7.4. Концепт дискретної системи опалення	266
Висновки за розділом 7.	278
ВИСНОВКИ	281
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.	287
ДОДАТКИ	316
А - Д. Акти впровадження науково-дослідних результатів дисертаційної роботи	316
Е. Проектування і виготовлення індивідуального теплового пункту.	335
Є. Технічні дані джерела живлення котла «Віктор 100»	365
Ж. ПРОТОКОЛ № 1/ДЗ-80/2019 випробувань мобільного теплового акумулятора	367
З. Договір і акт впровадження наукових результатів дисертаційної роботи	380

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- c – питома теплоємність, кДж /кг·К;
 ρ – густина, м³/кг;
 H – висота, м;
 ΔH – зміна ентальпії, Дж;
 K – це проникність пористого середовища;
 k_r – коефіцієнт радіаційної тепловіддачі;
 k – коефіцієнт теплопередачі, Вт/м² К;
 m – вага зразка, кг;
 p – тиск, Па;
 Q – теплове навантаження, Вт;
 q_r – густина радіаційного теплового потоку;
 T, t – температура, °С;
 u – поздовжня швидкість, м/с;
 V_n – нескінченномірний простір;
 V – об'єм, м³;
 x, y – поздовжня та поперечна координата, відповідно;
 α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м² К;
 δ_m – товщина стінки, мм;
 ε^* – вектор-стовпець деформацій;
 ε – енергії взаємодії, Дж;
 λ_p – теплопровідність РСМ, Вт/(м·К);
 ν – кінематична в'язкість рідини, м²/с;
 σ – напруження, Па;
 τ – час, с;
 ϕ – пористість;

Індекси верхні:

$\min$ – мінімальне значення;

$\max$ – максимальне значення.

Індекси нижні:

втр – втрати;

k – кінцеве значення величини;

розрах. – розрахункове значення;

TP – теплоакumuлююча рідина;

eff – ефективне значення;

h – скінченномірною підобласть;

k – крок;

n – початкове значення величини

p – речовина;

T, t – температура;

0 – початкове або нульове значення;

Скорочення:

ІТП – індивідуальний тепловий пункт;

КМЦ – Карбоксиметилцелюлоза;

МТА – мобільний тепловий акумулятор;

ТА – тепловий акумулятор;

ТАМ – теплоакumuлюючий матеріал;

ЦСО – централізована система опалення;

DPD – dissipative particle method;

HPG – гідроксипропілгуар;

HSM – heat storage materials;

LBM – lattice Boltzmann methods;

MD – molecular dynamics method;

M-TES – Mobile thermal energy storage;

PCM – phase change materials;

WSP – water soluble polymers.

Безрозмірні величини:

Da – параметр Дарсі;

Fo – число Фур'є;

Ja – число Якоба;

Nu – число Нуссельта;

Ra – число Релея;

Re – число Рейнольдса.

Sr – число Старка;

Sh – число Струхаля;

Kn – число Кнудсена;

Pr – число Прандля;

Θ – безрозмірна температура.

ВСТУП

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми розвитку теоретичних засад транспортування теплової енергії безтрубним способом, а саме створенню мобільних теплових акумуляторів в яких застосовуються вибухо- і пожежо безпечні теплоакumuляційні речовини, що дозволяє доставляти теплову енергію громадськими шляхами споживачу. Для цього було вирішено нагальну задачу виготовлення мобільного теплового акумулятора тепловою потужністю 0,5МВт, в яких застосовано ємнісні теплові акумулятори оптимізованої конструкції. Також, для досягнення поставленої мети створено і досліджено вибухо- пожежобезпечну теплоакumuлюючу рідину на основі водорозчинних полімерів природного походження та підібрано і досліджено матеріали з фазовим переходом природного походження.

Актуальність дисертаційних досліджень.

Мобільне теплове транспортування теплової енергії новий напрямок в розвитку теплових акумуляторів ємнісного типу в яких використовуються у якості «робочого тіла» спеціально підібрані теплоакumuлюючі речовини.

У країнах Європейського союзу мобільні теплові акумулятори створюються з метою транспортування теплової енергії від джерел генерації зеленої енергетики до віддалених поодиноких споживачів. Таке застосування МТА зумовлює відносно не високі температури акумулювання до 250 °С та застосування матеріалів з фазовим переходом. У окремих випадках застосовується термохімічного способу акумулювання з спеціально створеним теплоакumuлюючим матеріалом, а конструкції ємностей ТА піддаються оптимізації. У Китайській Народній Республіці мобільне транспортування теплової енергії застосовується переважно при заряджанні МТА скидною температурою підприємств, що характеризуються високими температурами до 450 °С і подається до споживчів розташованих або на території підприємств

або не подалік. За таких умов застосовується термохімічний спосіб акумулювання з спеціально створеними теплоакумуючими речовинами. Конструкції теплових акумуляторів не потребують особливої модернізації, зазвичай це ємності на 5 чи 10 м³. Однак, необхідно зауважити, що обидва напрямки розвитку транспортування теплової енергії мобільним способом розвиваються в межах законодавчих баз країн користувачів. Створено відповідні нормуючі документи властивостей теплоакумуючих матеріалів, визначено умови і обмежуючі фактори транспортування теплової енергії.

На території України мобільне транспортування теплової енергії орієнтовано на застосування при виникненні надзвичайних та аварійних ситуацій в умовах бойових дій для забезпечення теплом інфраструктурних, військових та побутових споживачів, що є важливою і актуальною задачею на сьогоднішній день. У якості джерела заряджання можуть бути використані як об'єкти зеленої енергетики так і скидна теплота підприємств. Але обмежуючим фактором є відсутність законодавчої бази для транспортування теплової енергії безтрубним способом, тому створення вибухопожежобезпечної теплоакумуючої речовини є також важливою і актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконана у відділі тепломасообміну та гідродинаміки в елементах теплоенергетичного устаткування Інституту технічної теплофізики НАН України та безпосередньо пов'язана з науковими дослідженнями в межах наступних тем:

- Державне замовлення МОН України «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. (2019-2020 рр., № ДР 0119U103145);
- 1.7.1.894 «Розвиток наукових засад теплової взаємодії будівлі з довкіллям та підвищення її енергоефективності на основі застосування

інтелектуальних систем енергозбереження» (2020-2024 рр., № ДР 0120U101228);

-1.7.1.898 «Розроблення і оптимізація енергозберігаючих систем геотермальної вентиляції для енергоефективних будинків» (2020-2022 рр., № ДР 0120U101263).

Мета і задачі дослідження.

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 теплоакумуючих 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 теплоакумуючим 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 нестационарну 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 з 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 тепловому 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 були використанні методи аналітичного та чисельного моделювання процесів складного теплообміну і гідродинаміки в мобільному тепловому акумуляторі МТА-0,5МВт та акумуляційних ємностях; 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-промислові випробування мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше сформульовано теоретичні підходи на основі проведеного аналітичного та чисельного моделювання тепломасообмінних та гідродинамічних процесів мобільного теплового акумуляування 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 нестаціонарної задачі отримано зміни профілів температури та коефіцієнта тепловіддачі у паровій плівці в залежності від часу. Показано вплив випромінювання (число Старка) на коефіцієнт тепловіддачі;

- розвинуто нестаціонарну модель осцилюючого потоку рідини у плоских та циліндричних каналах з пористим середовищем. Проведено порівняння аналітичних даних з чисельними результатами, одержаними за допомогою методу гра-ток 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 теп-лоакуючої рідини.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується використанням загальноприйнятих методик, що базуються на класичних аналітичних та чисельних методах. Проведено верифікація отриманих в роботі експериментальних даних з результатами теоретичних досліджень. Точність і надійність результатів експериментальних досліджень зумовлена використанням сучасних вимірювальних приладів і засобів з використанням комп'ютерної обробки.

Практичне цінність отриманих результатів:

1. 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).

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

3. Оптимізовано конструкцію ємнісного акумулятору в якій застосовано три робочих тіла – теплоносій (вода), нова композиція теплоакуючої рідини та матеріал з фазовим переходом, що дозволило підвищити теплову акумуляцію і подолати тепловому стратифікацію по висоті ємності.

4. За результатами математичного моделювання і комплексних експериментальних досліджень створено і застосовано нову вибухо- і пожежобезпечну композицію теплоакumuлюючої 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.

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

6. Результати математичного моделювання теплоомасообмінних 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, що виконані у співавторстві автором виконано - постановка задачі, вибір моделей, аналіз та узагальнення результатів досліджень [1,2,4,7,13,16,17,18,20], постановка задачі експериментальних досліджень, вибір методик та проведення досліджень, а також аналіз отриманих результатів [5,10,19,21,22], постановка задачі, аналіз літературних джерел, вибір методик досліджень та складових, проведення розрахунків та узагальнення отриманих результаів [3,6,8,9,11,12,14,15,23,24].

Апробація результатів дисертації. Основні наукові, теоретичні положення та практичні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на 15 міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях:

1. 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;

2. XXX Международная конференция «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики», 19–20 ноября 2020 г., г. Киев ;

3. XX міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених ”Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання”, 28–29 квітня 2021 р., Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,

4. XXII міжнародної науково-практична конференції студентів, аспірантів і молодих вчених ”Ресурсенергозберігаючі технології та обладнання”, 24-26 травня 2022 р., Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,

5. XXX 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»;

6. 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,

7. XXXI всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених «Обладнання хімічних виробництві підприємств будівельних матеріалів», 5–7 грудня 2022 р., Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

8. XXXII всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених ”Обладнання хімічних виробництві підприємств будівельних матеріалів”, 3 травня 2023 р., Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»;

9. XXIII міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених ”Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання”, 3 травня 2023 р., Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»;

10. Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XXIV міжнародної науково-практичної конференції, 18–19 травня 2023 р., Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України;

11. XXXIII всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених "Обладнання хімічних виробництві підприємств будівельних матеріалів", 15 грудня 2023 р., Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»;

12. XXVI міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання", 16 травня 2024 р., Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»;

13. XIX міжнародна наукова конференція «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв», 9–13 вересня 2024 р., Одеса: Одеський національний технологічний університет.

14. Всеукраїнська науково-практична конференція «Актуальні проблеми забезпечення діяльності органів і підрозділів системи МВС України технічними засобами в умовах воєнного стану», 26 квітня 2023 р., Київ;

15. XX міжнародна наукова конференція «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв», 9–13 вересня 2024 р., Одеса: Одеський національний технологічний університет.

Публікації. За результатами досліджень, які викладені в дисертації, опубліковано 23 наукових працях:

- ✓ 1 розділ колективної монографії (Scopus);
- ✓ 7 у виданнях що індексуються наукометричними базами даних Scopus і Web of Science;
- ✓ 9 публікацій в наукових журналах, що входять до переліку фахових видань України;
- ✓ 4 статей у фахових міжнародних виданнях;
- ✓ отримано 2 патенти України на винахід.

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

РОЗДІЛ 1.

ОСНОВНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ МОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУВАННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

1.1. Сучасний стан систем теплопостачання у світі та Україні. Застосування мобільних теплових акумуляторів

В застарілих не ефективних системах централізованого теплопостачання, що залишились у «спадок» в багатьох містах пострадянських країн є актуальними низка проблем – це значні теплові втрати внаслідок зношеності трубопроводу та обладнання ЦСО, малоефективне інтелектуально застаріле обладнання систем розподілу та обліку, не актуальні з низьким коефіцієнтом КПД джерела генерації теплової енергії. Переважна більшість ТЕЦ на території України побудована у 60-70-их роках ХХ століття і ресурс їх застосування вичерпано [1,2], окрім того, переважна більшість енергогенеруючих джерел до 75% та систем розподілення понищено внаслідок ворожих атак з початку повномасштабного вторгнення з 24 лютого 2024р [3,4]. Однак, такий стан енергетики дає можливість створення нової системи і застосування нових технологій, що активно використовуються у країнах з розвиненою економікою. На рис.1.1 представлено – еволюцію системи теплопостачання, які умовно розділено на 4 етапи, що характеризуються такими параметрами, як: зниження температури теплоносія при підвищенні ККД обладнання системи теплопостачання. Важливим характеристиками є розширення джерел генерації енергії, та використання теплових акумуляторів. Низка джерел публікують данні про розвиток 5-го покоління систем теплопостачання [5-10].

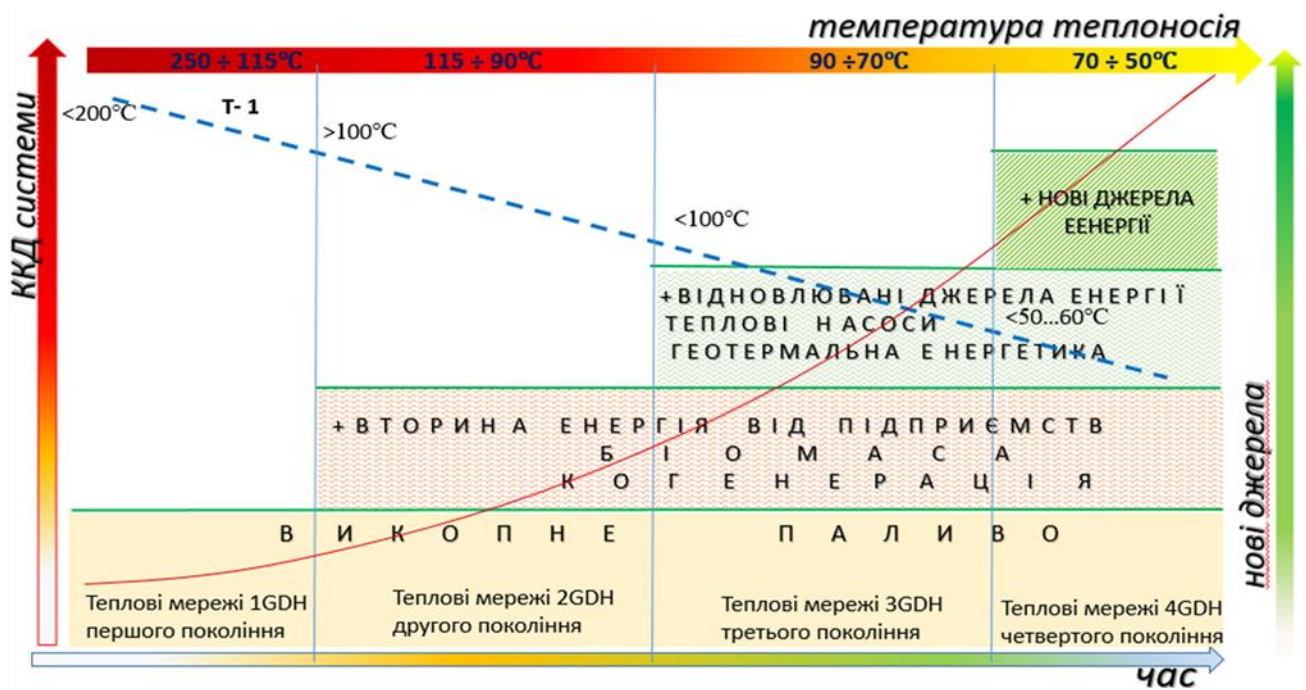


Рис.1.1. Еволюція систем тепlopостачання [5].

Країни з розвинуеною економікою США, Китай, Західна і Північна Європа знаходяться в перехідному режимі до 4 і 5 поколінь тепlopостачання які характеризуються [5,6]:

- застосуванням низькотемпературних режимів теплозабезпечення. Впровадження температурних параметрів теплоносія до 50 / 30 °C та зменшення робочого тиску;
- використанням сумісно системи централізованого постачання для постачання тепла взимку або холоду – в літку;
- використанням широкого спектру нетрадиційних джерел енергії - відновлювальної енергетики (ВДЕ), теплових насосів, вторинних теплових енергоресурсів (ВТЕР), тощо;
- високою стабільністю роботи теплових мереж та енергетичної системи за рахунок злагодженої роботи системи з застосуванням акумуляторів різних конфігурацій;
- високою ступеню автоматизації та диспетчирезації процесів контролю та управління параметрів системи, зокрема створення інтелектуального управління системою.

На кожному з етапів теплозабезпечення використовуються ТА різноманітного конструктивного виконання та принципу дії. Застосування ТА дозволяє вирішити проблеми пов'язані з [8-12]:

- компенсацією піків до 30% та оптимізація графіків виробництва теплової енергії шляхом накопичення надлишкової енергії. Частка використання теплової енергії в річному споживанні може сягати 100% ;
- накопиченням теплової енергії, яка буде використана під час відключення (відсутності) енергопостачання;
- розширенням спектру використання ВДЕ та ВТЕР в якості джерел енергії;
- можливістю поєднання використання різних джерел генерації у загальнодержавній системі;
- зменшенням витрат палива до 10%, при зменшенні викидів у атмосферу при 20%.

Класифікацію ТА можна умовно представити у вигляді схеми, рисунок 1.2.



Рис.1.2. Класифікація теплових акумуляторів за робочими характеристиками [5].

Одним з сучасних напрямків теплового акумулювання є застосування мобільних теплових акумуляторів M-TES (МТА) для побудови мобільної безтрубної системи тепlopостачання. Основними робочими характеристиками МТА є відстань на яку транспортується тепла енергія і робочий діапазон температур теплоакумулюючої рідини. Теплові акумулятори можна класифікувати [12-14]:

1. за періодом зарядки і розрядки - короткострокові ТА(до 3 днів), середньострокові ТА (до 1 місяців), довгострокові ТА.

2. за рівнем робочої температури - низькотемпературні ТА (до 100 °С), середньотемпературні ТА (від 100 до 400 °С), високотемпературні ТА (>400 °С).

3. за природою ТАМ:

- термохімічні ТА, засновані на виділенні або поглинанні теплоти в зворотних хімічних і фотохімічних реакціях;
- теплоємнісні ТА, в яких використовується теплоємність ТАМ без зміни агрегатного стану;
- ТА на фазовому переході, в яких використовується прихована теплота плавлення речовини.

1.2. Аналіз застосування мобільних систем накопичення теплової енергії в системах тепlopостачання. Основні обмежуючі параметри застосування M-TES

Акумулювання теплоти набуває широкого розповсюдження на кожному з етапів тепlopостачання - при генерації, транспортуванні, розподіленні та у споживача. Застосовуються різні технології та обладнання, що дозволяють забезпечити різні теплові потужності, температурні діапазони та час акумулювання. В мобільних теплових акумуляторах переважно застосовують два механізми акумуляції тепла:

- термохімічний, що характеризується високим діапазоном температур до 400°C та значною тепловою потужністю до кількох МВт [15-18];

- латентне зберігання теплової енергії, характеризується діапазоном температур до 150°C та тепловою потужністю до 1 МВт [5,19-25].

З огляду на перехід до помірних діапазонів температур 4 і 5 поколінь систем теплозабезпечення [5,26-28], де у якості джерела застосовуються об'єкти зеленої енергетики, найбільш перспективних є акумулювання на основі технології прихованого (латентного) зберігання енергії або теплоти фазового переходу. В якості робочого тіла використовують матеріали або речовини з фазовим переходом. Таку технологію застосовують у мобільних теплових акумуляторах, оскільки основною перевагою є значна теплопродуктивність при відносно не великих об'ємах. Також, важливим аспектом є температурний діапазон який забезпечується температурою фазового переходу підібраної речовини чи матеріалу [29-31].

Необхідно зазначити, що не існує універсального матеріалу з фазовим переходом (далі, РСМ), що забезпечує різні робочі температури та інші технологічні показники. Тому, перспективним напрямком досліджень, що динамічна розвивається, є створення композицій матеріалів з фазовим переходом з різноманітними тепловими характеристиками. Важливим фактором є безпечність їх застосування, а саме - не токсичність, пожежо-вибухобезпечність, оскільки РСМ працює в ємності, яка весь час рухається громадськими шляхами [30,32].

Для отримання якісних і безпечних РСМ в Institute Fraunhofer UMSICHT (Німеччина) на основі комплексних робіт розроблено документ RAL [16,23] з основними поняттями, параметрами та методологією за якою відбувається дослідження і сертифікація матеріалів з фазовим переходом. Згідно [16,23] основними параметрами, що регламентують адекватну роботу РСМ є:

- діапазон температур фазового переходу і кількість накопиченої теплової енергії (п.3.5.1.1 Дозволені методи вимірювання, п.3.5.1.2 Зміст результатів випробувань та протоколу випробування, п.3.5.1.3 Виконання вимірювання);

- теплоємність (п.3.5.2.1 Дозволені методи вимірювання, п.3.5.2.2 Зміст результатів випробувань та протоколу випробування, п.3.5.2.3 Виконання вимірювання);
- стабільність при термоциклуванні (п.3.5.3.1 Дозволені методи вимірювання, п.3.5.3.2 Зміст результатів випробувань та протоколу випробування, п.3.5.3.3 Виконання вимірювання);
- перевірка критеріїв якості (безпечність застосування).

При розробці протоколу досліджень створюваної теплоакumuлюючої рідини, було застосовано підходи викладені в [23].

За останні роки в Європі, Китаї та Японії були побудовані мобільні теплові акумулятори (далі М-TES), що застосовують різні за складом РСМ. Переважно, це композиції що були створені для певних умов в яких працює кожний окремий М-TES, їх вибір залежить від температури джерела заряджання і регламентує діапазон роботи мобільного теплового акумулятору [33-36]. Необхідно відзначити, що М-TES – це ємність заповнена робочим тілом, яка транспортується за допомогою автомобілів. Однак, вказані М-TES мають різну теплову потужність від 200кВт до 4МВт і різні дистанції транспортування від 0,5 до 20 км від джерела теплоти до споживача. У таблиці 1.1 представлено основні технічні характеристики транспортування теплової енергії М-TES.

Таблиця 1.1. Характеристики транспортування теплової енергії M-TES [14,37-43].

Теплова продуктивність	PCM, об'єм	Джерело теплоти	Споживач	Дистанція транспортування, км	Розробник
1	2	3	4	5	6
200 кВт/год	тригідрат ацетату натрію	будь яке з температурою до 115 °C	-	-	Institute Fraunhofer UMSICHT, Deutsches [37]
2,3 МВт/год	zeolite (14 tons)	пар від сміттєспалювального заводу	для заряджання сховища гарячим повітрям 130 °C і процесу сушіння	7	Research center ZAE Bayern, Deutsches [13]



1	2	3	4	5	6
4 МВт/год	гідроксид барію (25 м ³ , LSG Sky Chefs)	відпрацьоване тепло від електростанції	кухні електро-станції	-	by LSG Sky Chefs, Cologne [38]
		відпрацьована пара заводу електроніки SANYO	попередній підігрів зворотної води котла	20	Osaka, Japan [39]
		тепло збиралось з очисних споруд у м. Кійосе	міська гімназія	2,5	
		утилізації вихлопних газів із печі відпалу сталеливарного заводу в м. Осака	громадська лазня	3	



1	2	3	4	5	6
6,5 ГДж (~1,МВт)	HECM-WD03 з додаванням рідкоземельних елементів	відпрацьоване тепло сталеварного заводу в м. Даляня	готелі розташовані поряд	-	Zhongyineng (Beijing) Technology Co, China [40] 
-	-	відпрацьована пара електростанції	опалення школи поряд	-	Qingdao Aohuan New Energy Group Co., Ltd., China [41] 
55кВт	PCM (800кг)	геотермальна енергетика	приватні будинки	0,5-5	Department of Thermal and Fluid Flow Machines, Faculty of Energy and Fuels, AGH University of Krakow, Poland [42,43]

«-» - відсутня інформація стосовно параметру.

Застосування М-TES дозволяє вирішити низку проблем пов'язаних з забезпеченням віддалених поодиноких споживачів, а також при виникненні аварійних ситуації. Майже у всіх випадках використання М-TES джерелом теплоти є потужні вторинні ресурси, що розташовані неподалік від споживача. ВТЕР, що вивільняються під час роботи підприємств, дозволяють знизити не лише викиди у оточуюче середовище, а й застосувати їх з максимальною вигодою. Теплова енергія від ВТЕР має різні потужності, тому і обладнання, а саме РСМ підібрано відповідно до вихідних умов. В кожному з представлених випадків застосовуються різні РСМ матеріали або теплоакumuлюючі рідини, що відповідають реальним умовам експлуатації [34,35,44]. Як правило, їх склад та характеристики є предметом захищеним правом інтелектуальної власності, тому їх склад і технічних характеристики не розголошуються.

Основні складові будь якого М-TES - це ємність і робоче тіло (теплакумуляційний матеріал) [14,37-43]. З наведених прикладів очевидно, що змінюючи ці два параметри можливо впливати на теплову потужність та дистанцію транспортування теплової енергії, тому розглянемо детально ці два параметри у наступних пунктах дисертації.

1.3. Застосування теплоакumuлюючих рідин і матеріалів з фазовим переходом в мобільних теплових акумуляторах

В зазначених в таблиці 1.1 М-TES застосовується одна теплоакumuлююча рідина або матеріал з фазовим переходом, яка регламентує температурний діапазон роботи обладнання та можливу дистанцію транспортування [37-43]. Склад теплоакumuлюючих речовин є предметом комерційної таємниці і як правило, не розголошується. Однак, вона має бути відносно безпечною при транспортуванні. У випадках коли транспортується теплова енергія з високим запасом теплоти, застосовується термохімічний спосіб акумуляції з застосуванням агресивних речовин, що є не безпечним

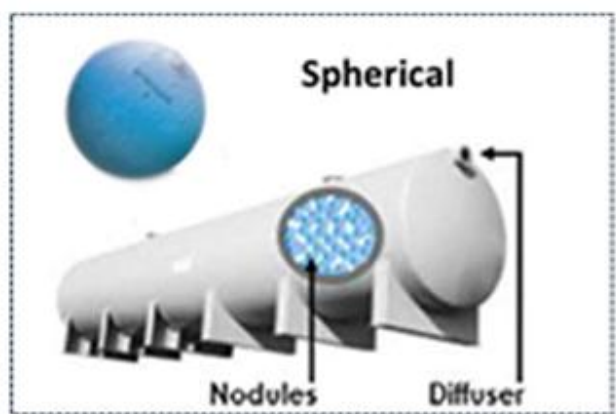
для людей і оточуючого середовища. Такі перевезення регулюються суворими міжнародними та національними стандартами, тому окремим обмежуючим фактором є законодавча база країни в якій створюється і застосовується M-TES. Як правило, дозволяється транспортування теплової енергії за межами міської забудови з огляду вибухо- і пожежної безпеки робочого тіла. Оскільки, в Україні відсутня законодавча база стосовно транспортування теплової енергії безтрубним способом, але діють законодавчі правила і обмеження з транспортування небезпечних речовин [45-47] при створенні дослідного зразка мобільного теплового акумулятора МТА-0,5 МВт обирали речовини і матеріали з фазовим переходом, що застосовуються у харчовій промисловості і не утворюють агресивних середовищ. Такі речовини, як правило, не схильні до окислення чи самозаймання, не токсичні та корозійно стійкі, а також не становлять вибухо-пожежної небезпеки. Ці фактори забезпечують екологічну безпеку. Окрім, цього вони є доступними на ринку України та економічно доцільними. Проведено експериментальні дослідження щодо складових теплоакумуюючих рідин та дослідження пов'язані PCM, що можуть застосовуватись в об'ємі та при витіканні в каналах [48-51], представлено в матеріалах даної дисертації у розділах 4,6.

Окрім води і водорозчинних полімерів рослинного походження, для уникнення замерзання теплоакумуюючої рідини при не регламентованому застосуванні обладнання, було використано антифриз Defreeze на основі природньої речовини бішофіту [52].

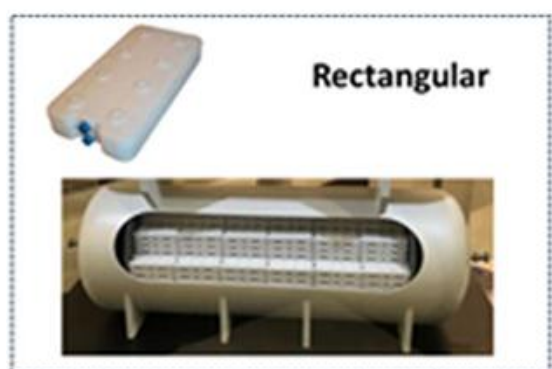
Акумулювання теплоти на основі матеріалів з фазовим переходом - це новий напрямок, що активно розвивається у Європі та Китаї. Основним наразі документом, що регламентує відповідність використання та методики досліджень описані у документі RAL 2018 року складення [16,23]. Основні параметри, що досліджуються при сертифікації PCM матеріалів, такими ж підходами користувались і ми при розробці протоколу досліджень.

Основними параметрами згідно «Спеціальні специфікації тестування для РСМ та РСМ-С» [16,23].

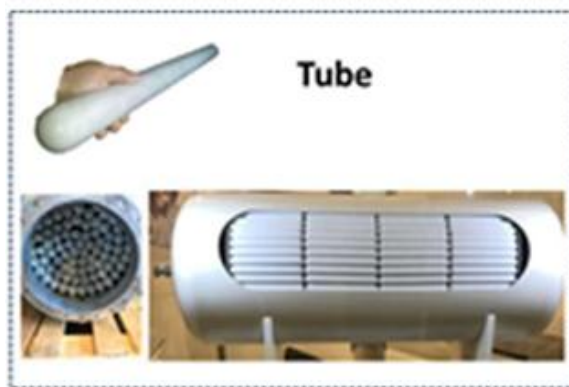
Розташування матеріалів з фазовим переходом у теплоакumuлюючих ємностях має особливе значення з точки зору вилучення теплової енергії та безпечності застосування. Застосовуються різні варіанти розташування РСМ в залежності від форми в якій вони використовуються, рис.1.3. [17,53-55]. Найбільш розповсюджена форма застосування РСМ в інкапсульованому вигляді – у сферичній формі (а), блочній (б, д), гільзовій (в), циліндричній (г). В будь якому вигляді зручному для застосування споживачу. Однак, теплові акумулятори при застосуванні матеріалу з фазовим переходом у інкапсульованому вигляді, як правило встановлені стаціонарно і не транспортуються. Це пов'язано з складністю фіксації РСМ у конструкції ємності, оскільки при транспортуванні акумуляційний матеріал не повинен рухатись і переміщуватись по акумуляційному об'єму і резонувати з рухом транспорту.



а)



б)



в)



г)

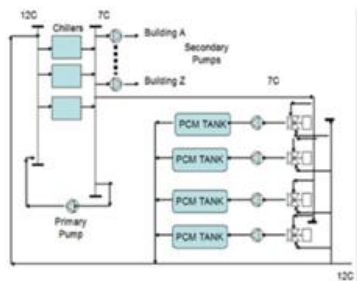


д)

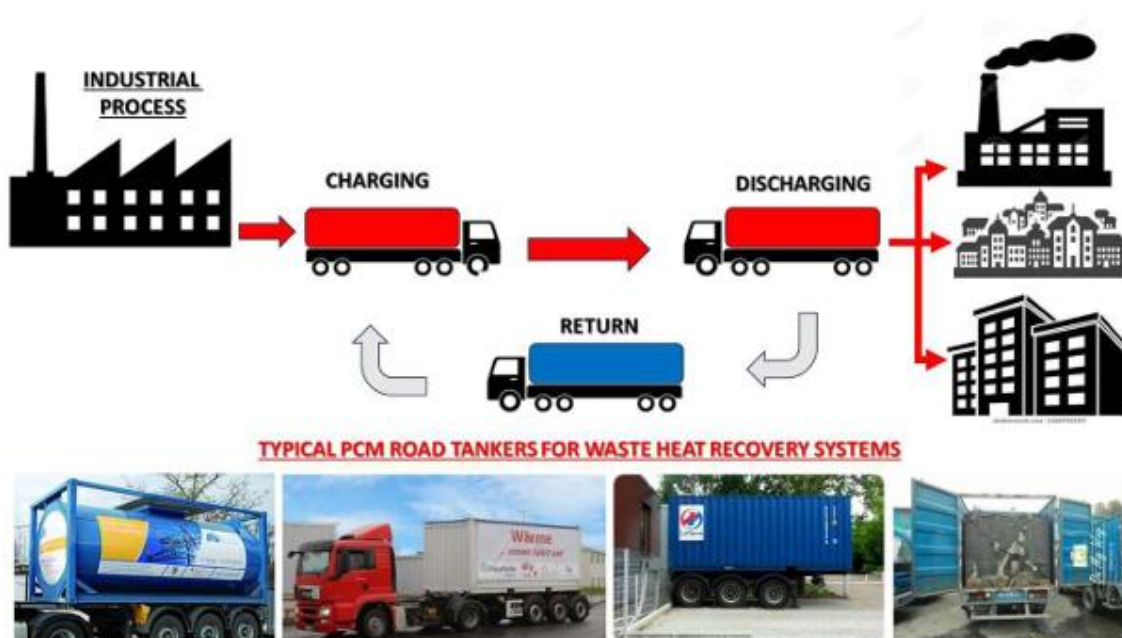
Рис. 1.3. Форми інкапсульованого матеріалу з фазовим переходом, що застосовуються у акумуляторах ємнісного типу: а) сферична [53]; б) блочна форма малих розмірів [53]; г) гільзоподібна [53]; в) циліндрична [54]; д) блочна форма середніх розмірів [55].

При транспортуванні ємнісних теплових акумуляторів за допомогою автомобілів, вся ємність заповнюється самою речовиною без капсулювання [55-57], також такий тип ТА використовується стаціонарно при встановленні поряд з потужним джерелом живлення. Таким чином, вирішується проблемне питання фіксації РСМ, однак зменшується рівень

аккумуляційної здатності всього мобільного теплового акумулятору, оскільки до 30% теплової енергії в такому об'ємі вилучити неможливо через технологічні аспекти, рис.1.4. [9,53,57].



а)



б)

Рис. 1.4. Застосування мобільних теплових акумуляторів ємнісного типу заповнених PCM: а) встановлена потужність TES 4_{блоки} x 60 м³ з PCM, що забезпечує загальну потужність 10 000 кВт·год [57]; б) застосування рекуперації та передачі відхідного тепла [55].

1.4. Теплові акумулятори ємнісного типу

Світовий досвід мобільного транспортування теплової енергії свідчить, що ємності M-TES застосовується прямий нагрів теплоакumuлюючої рідини, що дозволяє швидко вилучити теплову енергію. Однак, це ефективно при високій температурі джерела заряджання і близькій відстані транспортування, про що свідчать технологічні характеристики застосування M-TES викладені в таблиці 1.1.

Оскільки необхідно створити мобільний тепловий акумулятор, в діапазоні температур до 150 °C з тривалим часом акумуляції, запропоновано застосування непрямого нагріву теплоакumuлюючої рідини. Це можливо здійснити застосувавши дві теплоакumuлюючі речовини, одна з яких є матеріалом з фазовим переходом у необхідному діапазоні температур. І за рахунок синергетичного ефекту роботи двох теплоакumuлюючих рідин підвищити тривалість зберігання теплової енергії.

У розглянутих M-TES теплоакumuляційна ємність не має додаткових конструкцій в об'ємі ємності, оскільки застосовується один матеріал.

У роботі авторами [58] було попередньо проведено CFD-моделювання можливого перебігу процесу теплообміну, однак потрібно розробити теоретичні підходи до створення такого обладнання. Тому було проведено моделювання процесів теплообміну всередині «теплого ядра» заповненого з фазовим переходом (розділ 3, п.3.1), що дозволило якісно оцінити перебіг процесу нагріву і охолодження матеріалу з фазовим переходом. Також, проведено моделювання саціонарного і нестационарного комплексного теплообміну у середовищі при плівковому кипінні (розділ 3, п.3.2).

Дослідження теплообміну при плівковому кипінні в рідині, що прилягає до нагрітої поверхні, є актуальними для металургії, енергетики та електроніки [59]. Плівкове кипіння виникає в результаті взаємодії рідини з нагрітою поверхнею, коли щільність теплового потоку на стінці досягає

критичного значення [59]. Вплив теплового випромінювання на теплообмін при кипінні плівки рідини досліджується давно [60-64].

У роботі [65] проведено аналіз впливу теплового випромінювання на теплообмін при плівковому кипінні. Встановлено, що пряме випромінювання від поверхні до рідини може значно збільшити теплообмін під час плівкового кипіння. Отримано критерій, що визначає умови, за яких вплив випромінювання з поверхні на рідину є значним. У роботі [66] досліджено теплообмін при плівковому кипінні в прикордонному шарі за вимушеної конвекції. Вплив випромінювання розглядається шляхом включення членів випромінювання в рівняння енергії. Встановлено, що випромінювання підвищує температуру пари та ефекти теплопровідності на межі пар-рідина, тоді як теплопровідність біля стінки зменшується.

Результати теоретичного дослідження кипіння плівки в оптично тонкому ламінарному прикордонному шарі за значного випромінювання наведено в [66]. Визначено характеристики кипіння плівки на похилій поверхні та кулі за природної конвекції та на горизонтальній пластині за вимушеної конвекції. Для плівкового кипіння з природною конвекцією було показано, що випромінювання посилює теплопередачу від стінки до пари та від пари до межі розділу. Радіаційні ефекти стають більш значними при вищих температурах стінок або більш товстих парових плівках. Під час кипіння плівки на горизонтальній пластині з примусовою конвекцією випромінювання збільшує локальні числа Нуссельта та зменшує напруги зсуву на стінці та межі пара-рідина. Радіаційному ефекту може сприяти підвищення температури стінки, товщини парової плівки або зменшення швидкості набігаючого потоку.

У роботі [67] наведено результати чисельного моделювання задачі про кипіння плівки на горизонтальному циліндрі у великому об'ємі рідини з урахуванням випромінювання. Також отримано наближений аналітичний розв'язок задачі, який добре узгоджується з чисельним розв'язком для рідин з різними фізичними властивостями.

Теоретичне дослідження турбулентного плівкового кипіння в горизонтальній трубі із зовнішнім потоком рідини представлено в [68,69]. Теоретичний аналіз включає радіаційні ефекти та вихрову дифузію [68]. З'ясовано вплив параметрів турбулентності та радіаційних ефектів на товщину плівки та число Нуссельта.

У [70] було виконано чисельне моделювання плівкового кипіння рідини на поверхні високотемпературного струменя розплаву за допомогою методології CFD (обчислювальної гідродинаміки). Локальне поглинання радіаційного тепла в парі та рідині представлено як член джерела в рівнянні енергії. Результати показали, що вплив переохолодження рідини на характеристики кипіння плівки зменшується зі збільшенням температури поверхні. Коефіцієнт тепловіддачі при плівковому кипінні чутливий до температури поверхні в діапазоні температур 1400-3300 К, оскільки теплопровідність пари та інші його фізичні властивості різко змінюються в цьому діапазоні температур.

Стаття [71] аналізує кипіння плівки на плоскій горизонтальній гарячій сталевій пластині за допомогою CFD моделювання. Кількісно оцінено вплив швидкості подачі води та температури поверхні пластини на поведінку плівки при кипінні. Модель включає як конвективний, так і радіаційний теплообмін, причому останній більш важливий для підтримки плівкового кипіння при високих температурах. Аналіз теоретичних та експериментальних досліджень теплообміну в міні- та мікроканалах наведено в [72-76]. Результати аналітичних досліджень порівнюються з результатами чисельного моделювання на основі ґраткового рівняння Больцмана та з результатами експерименту.

Огляд проведених вище досліджень свідчить про значний інтерес до вивчення впливу теплового випромінювання на теплообмін при плівковому кипінні рідин. Однак, багато досліджень не розглядають радіаційний теплообмін у своїх підходах до моделювання. Під час гартування часто використовують різні масла, які можна розглядати як оптично густе

середовище. Тому метою цього теоретичного дослідження є моделювання складного теплообміну (включаючи теплове випромінювання) в стаціонарних і перехідних умовах.

В результаті проведеного аналізу сформульовано науково-технічну проблему, рис.1.5.

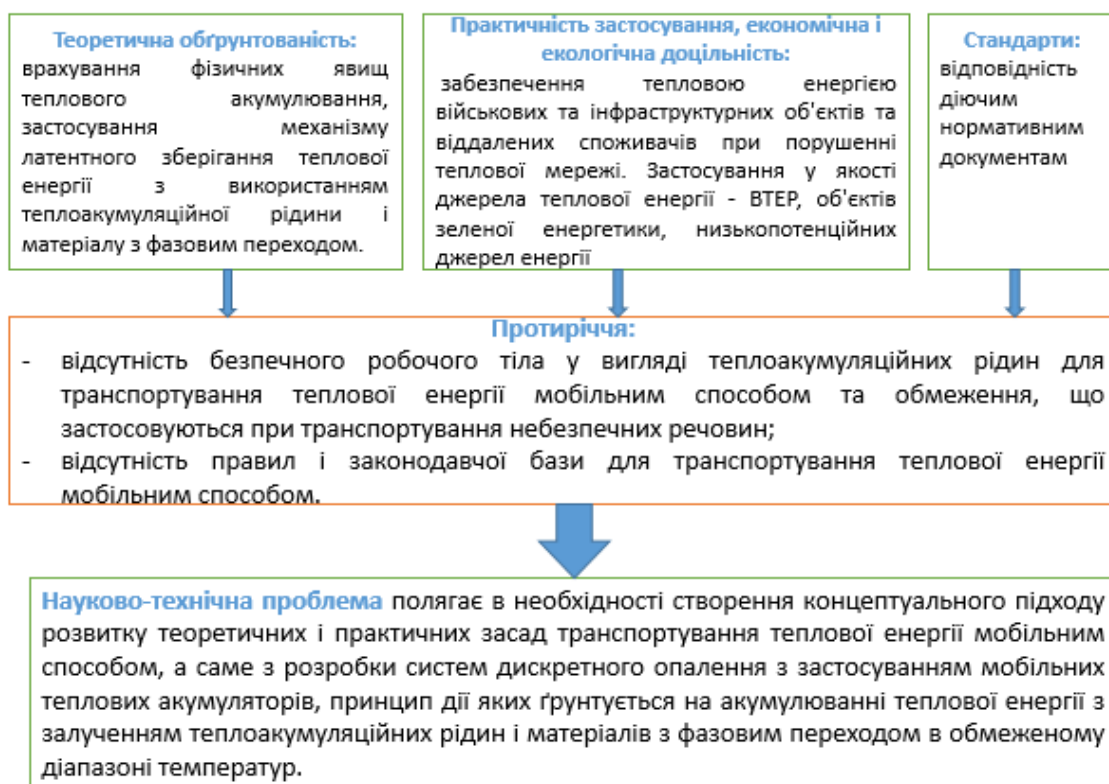


Рис. 1.5. Формулювання науково-технічної проблеми.

1.5. Мета і задачі досліджень

У результаті аналітичних досліджень літературних джерел було встановлено, що добре висвітлено такі питання як механізми акумулювання що застосовуються в мобільних теплових акумуляторах, окреслено основні технологічні параметри джерел енергії та можливі дистанції транспортування теплової енергії до споживача. Зазначено основні робочі характеристики МТА в залежності від поставленої задачі їх використання. Також, є інформація стосовно тестування і апробації теплоакуюлюючих матеріалів.

Однак, недостатньо висвітлено питання складу теплоакumuлюючих матеріалів та відсутні данні стосовно їх технологічних і теплофізичних параметрів. А також зміна цих параметрів під час експлуатації. Відсутні данні вибору і характеристик при застосуванні матеріалів з фазовим переходом. Їх розташування в ємностях і способи інтенсифікації теплообміну викликані конструктивними особливостями ємностей в яких вони розташовані.

З огляду на вищезазначене, **мету роботи можна сформулювати наступним чином:** створення теплофізичних засад теорії процесів мобільного теплового акумулювання та їх апробація в реальних умовах роботи мобільного теплового акумулятору МТА-0,5МВт

На основі проведено огляду для досягнення поставленої мети були сформульовані та вирішені наступні **завдання:**

1. на основі аналізу літературних джерел встановити основні технічні параметри застосування низькопотенційного мобільного теплового акумулювання та тепло-фізичні властивості теплоакumuлюючих 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 в середині «теплового ядра» заповненого теплоакumuлюючим матеріалом в умовах фазового переходу першого роду для визначення швидкості і часу нагріву РСМ;
 - розвинути теорію радіаційно-конвективного теплообміну при плівковому кипінні рідини на вертикальній нагрітій поверхні в стаціонарному та нестаціонарному режимах з метою визначення ефективних температурних параметрів акумуляційного процесу;
 - розвинути нестаціонарну модель осцилюючого потоку рідини у плоских та циліндричних каналах з пористим середовищем для оцінки впливу характеру руху теплоносія на витрати.

3. створити вибухо-пожежобезпечне робоче тіло мобільного теплового акумулятору, а саме теплоакumuлюючу рідину на основі водорозчинних полімерів рослинного походження;
4. дослідити зв'язок наноструктур теплоакumuлюючої рідини з застосуванням дворівневої моделі формування багатокомпонентних наноструктур;
5. на основі експериментальних досліджень визначити параметри теплофізичних характеристик теплоакumuлюючої рідини;
6. дослідити на основі теоретичних і експериментальних досліджень доцільність застосування теплоакumuлюючих матеріалів при фазовому переході в тепловому акумуляторі ємнісного типу;
7. розробити концепт мобільного транспортування теплової енергії з застосуванням мобільних теплових акумуляторів нової конструкції з латентним зберіганням тепла за допомогою безпечних теплоакumuлюючих рідин і матеріалів з фазовим переходом.

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

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

РОЗДІЛ 2.

ОГЛЯД МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

2.1. Метод симетрій

Переважає більшість задач, що стосуються фізико-математичного моделювання процесів тепломасоопереносу та гідро-газодинаміки, як правило, зводиться до вирішення диференціальних рівнянь різного ґатунку. Одним з таких зручних для аналізу диференціальних рівнянь є застосування методу групи симетрій (груп Лі) диференціальних рівнянь [77-78].

Розглянемо спосіб аналізу диференціальних рівнянь в частковій похідній на основі їх груп симетрії [79]. Даний спосіб ґрунтується в знаходженні автомодельних форм, таких форм змінних, які дозволяють скоротити число незалежних аргументів в системі диференціальних рівнянь. Тобто, якщо система залежить від двох аргументів, то автомодельні форми дозволяють звести цю систему до системи звичайних диференціальних рівнянь. Якщо кількість незалежних аргументів більше двох, то автомодельні форми дозволяють зменшити їх кількість, що спрощують процес аналітичного чи чисельного інтегрування системи рівнянь.

Автомодельні змінні визначаються як інваріанти групи симетрій, оскільки вирішення однорідних диференціальних рівнянь в часткових похідних першого порядку, утворених інфінітезимальним генератором. Однак необхідно розрізняти головні змінні, які будуть наявні лише в автомодельні форми змінних, і параметричні змінні, що входять у формули для автоматичних функцій як параметри [79].

Якщо інфінітезимальний генератор заданий формулою (2.1.1)

$$q = \sum_{i=1}^m \xi_i \frac{\partial}{\partial x_i} + \sum_{\gamma=1}^n \phi_{\gamma} \frac{\partial}{\partial f^{\gamma}} \quad (2.1.1)$$

то, для знаходження автомодельних змінних $\eta(x_i)$ необхідно вирішити наступне рівняння

$$\sum_{i=1}^m \xi_i \frac{\partial \eta(x_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1.2)$$

Для знаходження автомодельних функцій використовується рівняння наступного вигляду

$$\xi_i \frac{\partial \phi}{\partial x_i} + \sum_{\gamma=1}^n \varphi_{\gamma} \frac{\partial \phi}{\partial f^{\gamma}} = 0 \quad (2.1.3)$$

В першій складовій представленого рівняння похідна береться по тій незалежній змінній, котру обрано як параметричну. Зазвичай, параметрична змінна обирається з фізичних міркувань, процесу що описується.

Рівняння (2.1.2) і (2.1.3) вирішуються методом характеристик описаних в [80]. В результаті вирішення рівняння (2.1.3) маємо систему рівнянь

$$\phi^{\gamma} = \phi^{\gamma}(x_i^{\text{par}}, f^{\gamma}). \quad (2.1.4)$$

Данні рівняння вирішуються відносно f^{γ} , враховуючи, що автомодельні функції ϕ^{γ} залежать від автомодельних змінних η , отримаємо

$$f^{\gamma} = \mathfrak{Z}(x_i^{\text{par}}) \phi^{\gamma}(\eta), \quad (2.1.5)$$

де $\mathfrak{Z}(x_i^{\text{par}})$ - функція, що залежить лише від параметричної змінної. Використовуючи додаткові симетрії, можливо перетворити (2.1.5) в

$$f^{\gamma} = \mathfrak{Z}(x_i^{\text{par}}) \phi^{\gamma}(\eta) + \mathfrak{N}(x_i), \quad (2.1.6)$$

таким чином, розширити клас автомодельних рішень. Якщо підставити (2.1.5) або (2.1.6) у вихідну систему диференціальних рівнянь в часткових похідних, то ця система або редуцює до системи звичайних диференціальних рівнянь (у випадку, коли залежності вихідної системи від 2 аргументів), або число незалежних аргументів зменшиться на одиницю. Оскільки, алгебра Лі такої системи диференціальних рівнянь може містити декілька підалгебр, то автомодельні змінні можуть бути побудовані декількома шляхами, а в якості параметричної змінної може бути вибрана будь яка незалежна змінна. При цьому підалгебри можливо групувати у довільному порядку. Що також збільшує число комбінацій для побудови автомодельних змінних [80].

У класичній теорії диференціальні рівняння мають значну кількість спеціальних методів для вирішення різних класів рівнянь. Спеціальні методи інтегрування диференціальних рівнянь є окремими випадками загальної процедури інтегрування. Така процедура інтегрування заснована на інваріантності зазначеного диференціального рівняння щодо певної групи симетрії. Метод симетрії, заснований на застосуванні груп Лі, що уніфікує і розширює межі застосування різних спеціальних методів інтегрування певних типів рівнянь першого порядку - однорідних рівнянь, рівнянь з змінними, що розділяються, рівнянь в повних диференціалах та інше [80]. Це твердження справедливе, також для систем рівнянь. Розглянемо як приклад, звичайне диференціальне рівняння першого порядку:

$$\frac{df}{dx} = \Phi(x, f) \quad (2.1.7)$$

Якщо припустити, що однопараметрична група перетворень G з інфінітезимальним генератором:

$$q = \xi \frac{\partial}{\partial x} + \varphi \frac{\partial}{\partial f} \quad (2.1.8)$$

є групою симетрії рівняння (2.1.7). Тоді використовуючи інфінітезимальний критерій:

$$\text{pr}^{(k)} q [\Lambda_r(x, f^{(k)})] = 0, \quad r = 1, \dots, l \quad (2.1.9)$$

і $\Lambda_r = 0$ для кожного інфінітезимального генератора групи G з урахуванням виразу для першого продовження q :

$$\text{pr}^{(1)} q = \xi \frac{\partial}{\partial x} + \varphi \frac{\partial}{\partial f} + \varphi^x \frac{\partial}{\partial f_x} \quad (2.1.10)$$

отримаємо диференціальне рівняння вигляду:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial f} - \frac{\partial \xi}{\partial x} \right) \Phi - \frac{\partial \xi}{\partial f} \Phi^2 = \xi \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \varphi \frac{\partial \Phi}{\partial f} \quad (2.1.11)$$

що подає умову, що група G є групою симетрії для (2.1.7). Будь-яке рішення рівняння з окремими похідними (2.1.11) надає однопараметричну

групу симетрії звичайного диференціального рівняння (2.1.7). Пошук рішень рівняння (2.1.11) виявляється зазвичай набагато важчим завданням, ніж рішення вихідного звичайного диференціального рівняння. Однак якщо таке рішення знайдено, це відразу дає можливість інтегрування рівняння (2.1.7).

В окремому випадку, коли $\xi = 1$ рівняння (2.1.11) трансформується в:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial f} \Phi = \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \varphi \frac{\partial \Phi}{\partial f} \quad (2.1.12)$$

Розв'язок цього рівняння, це – $\varphi = \Phi$. Тепер, (2.1.8) набуває нового вигляду:

$$q = \frac{\partial}{\partial x} + \Phi \frac{\partial}{\partial f} \quad (2.1.13)$$

Але, (2.1.13) є лише переформатованою інтрепритацією (2.1.7).

Якщо група симетрії відома, можливо застосування кількох різних методів, щоб інтегрувати рівняння (2.1.7). Відповідно до теореми [77-78] можна ввести наступні координати:

$$\sigma = \sigma(x, f), \quad \tau = \tau(x, f) \quad (2.1.14)$$

де векторне поле (2.1.8) та його перше продовження будуть зсувом

$$q = pr^{(1)}q = \partial/\partial \tau \quad (2.1.15)$$

Відповідно до умови (2.1.9), щоб бути інваріантним у новій системі координат, диференціальне рівняння не містити у явному вигляді τ . Тому, (2.1.7) відносно нових координатах має трансформуватися в

$$\frac{d\tau}{d\sigma} = T(\sigma), \quad (2.1.16)$$

яке інтегрується у квадратурах. Підставляючи отримане рішення виразу (2.1.14), отримуємо рішення вихідного рівняння в явному вигляді.

Змінні (2.1.14) будуються на основі розв'язання системи рівнянь:

$$q(\sigma) = \xi \frac{\partial \sigma}{\partial x} + \varphi \frac{\partial \sigma}{\partial f} = 0, \quad (2.1.17)$$

$$q(\tau) = \xi \frac{\partial \tau}{\partial x} + \varphi \frac{\partial \tau}{\partial f} = 1.$$

Перше рівняння системи (2.1.17) є наслідком формули для визначення групових інваріантів

$$q(f) = 0. \quad (2.1.18)$$

Друге рівняння (2.1.17) відображає той факт, що в нових координатах векторне поле має вигляд $\partial/\partial\tau$. Перше рівняння вирішується шляхом показників [81]. Щоб вирішити друге рівняння, необхідно його перетворити, ввівши додаткову функцію $\rho(x, f, z) = z - \tau\rho(x, f)$ з додатковим аргументом z . Тоді друге рівняння (2.1.11) трансформується на рівняння

$$\xi \frac{\partial(z - \tau)}{\partial x} + \varphi \frac{\partial(z - \tau)}{\partial f} + \frac{\partial(z - \tau)}{\partial z} = \xi \frac{\partial \rho}{\partial x} + \varphi \frac{\partial \rho}{\partial f} + \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0, \quad (2.1.19)$$

це рівняння просто вирішується методом характеристик, використовуючи співвідношення:

$$\frac{dx}{\xi} = \frac{df}{\varphi} = \frac{dz}{1}. \quad (2.1.20)$$

Розв'язання рівнянь (2.1.17) може бути таким же складним, як і інтегрування вихідного диференціального рівняння. Зокрема якщо розглядається симетрія (2.1.13), то на основі першого рівняння (2.1.17) ми автоматично отримуємо рівняння (2.1.7).

2.2. Метод ґраток Больцмана

Ґратчасте рівняння Больцмана (Lattice Boltzmann methods, LBM) - це клас методів обчислювальної гідродинаміки для моделювання рідин. На відміну від багатьох інших методів, цей метод не вирішує рівняння Нав'є - Стокса, а моделює потік рідини ньютонівської дискретним кінетичним рівнянням Больцмана. Зіткнення найчастіше враховуються за допомогою

моделі Бхатнагара – Гросса – Крука. Методи ґратових рівнянь Больцмана зручні завдяки їх концептуальній і обчислювальній простоті, але їх використання обмежене малими швидкостями і тим, що вони мають нестійку поведінку на межі рухливих тіл [82].

Метод ґрат Больцмана заснований на дискретизації рівняння Больцмана в наближенні BGK [83] названому так по прізвищах авторів (Bhatnagar-Gross-Krook).

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v_i \cdot \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{1}{\tau} (f^e - f), \quad (2.2.1)$$

У рівнянні (2.2.1) f^e – рівноважний розподіл молекул, що відповідає розподілу Максвелла

$$f^e = \rho \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{m(\vec{v} - \vec{u})^2}{2kT} \right). \quad (2.2.2)$$

Рівняння (2.2.1) у вигляді кінцевих різниць буде виглядати

$$\frac{f(x_i + \Delta x_i, v_i, t + \Delta t) - f(x_i + \Delta x_i, v_i, t)}{\Delta t} + v_i \frac{f(x_i + \Delta x_i, v_i, t) - f(x_i, v_i, t)}{\Delta x_i} = \frac{f^e - f}{\tau} \quad (2.2.3)$$

Для i -мірного простору число векторів швидкостей v_i є кінцевим. Приймаючи до уваги, що положення $x_i + v_i \Delta t$ повинне займати фіксоване положення в просторових решітках, $\Delta x_i = v_i \Delta t$. Крім того $f(x_i, v_i, t) = f(x_i, t)$ тому, що вектор швидкості фіксований. З врахуванням вище зазначеного, формула (2.2.3) набуває вигляду

$$\frac{f(x_i + \Delta x_i, t + \Delta t) - f(x_i, t)}{\Delta t} = \frac{f^e - f}{\tau}. \quad (2.2.4)$$

Розкладаємо ліву частину виразу (2.2.4) у ряд Тейлора до другого порядку

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v_i \frac{\partial f}{\partial x_i} + \frac{1}{2} \Delta t \left(\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial f}{\partial t} + v_i \frac{\partial f}{\partial x_i} \right) + v_j \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial f}{\partial t} + v_i \frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \right) + O(\Delta t^3) = \frac{f^e - f}{\tau} \quad (2.2.5)$$

Після підстановки з (2.2.1) значення для f одержимо

$$\frac{\partial f^e}{\partial t} + v_i \frac{\partial f}{\partial x_i} - \left(\tau - \frac{\Delta t}{2} \right) \left(\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial f}{\partial t} + v_i \frac{\partial f}{\partial x_i} \right) + v_j \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial f^e}{\partial t} + v_i \frac{\partial f^e}{\partial x_i} \right) \right) + O(\partial^3) = \frac{f^e - f}{\tau}. \quad (2.2.6)$$

Після домноження рівняння (2.2.6) на v_j , проінтегруємо отримане рівняння по v

$$\begin{aligned} \int v_j \left[\frac{\partial f^e}{\partial t} + v_i \frac{\partial f}{\partial x_i} - \left(\tau - \frac{\Delta t}{2} \right) \left(\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial f}{\partial t} + v_i \frac{\partial f}{\partial x_i} \right) + v_j \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial f^e}{\partial t} + v_i \frac{\partial f^e}{\partial x_i} \right) \right) \right] dv = \\ = \int v_j \frac{f^e - f}{\tau} dv \end{aligned} \quad (2.2.7)$$

Використовуючи для f^e вираз з (2.2.2) і проінтегрувавши (2.2.7) одержимо

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial(\rho RT)}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \left(\tau - \frac{1}{2} \right) \Delta t RT \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (2.2.8)$$

де $\tau = \tau / \Delta t$, $R = k / m$.

Права частина рівняння (2.2.7) буде дорівнювати нулю, оскільки інтеграл від інтеграла зіткнень, помноженого на інваріант зіткнення v дорівнює нулю. При виводі рівняння (2.2.8) враховувалися співвідношення:

$$\begin{aligned} \rho &= \int f dv, \\ \rho u &= \int v f dv. \end{aligned} \quad (2.2.9)$$

Порівнюючи рівняння Нав'є-Стокса з (2.2.8), можна побачити, що кінематична в'язкість визначається як

$$\nu = \left(\tau - \frac{1}{2} \right) \Delta t RT. \quad (2.2.10)$$

Роблячи безрозмірним (2.2.8) по мікромасштабах ґрат з врахуванням того, що середня швидкість часток

$$v_A = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{3RT}, \quad (2.2.11)$$

одержимо безрозмірну форму в «ґратчастих» змінних для нестисливого потоку

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial \tilde{t}} + \tilde{u}_j \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial \tilde{x}_j} = - \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{x}_i} + \frac{1}{3} \left(\tau - \frac{1}{2} \right) \frac{\partial}{\partial \tilde{x}_j} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial \tilde{x}_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial \tilde{x}_i} \right), \quad (2.2.12)$$

де

$$\tilde{u}_i = \frac{u_i}{v_A}, \quad \tilde{p} = \frac{p}{\rho v_A^2}, \quad \tilde{x}_i = \frac{x_i}{\Delta x}, \quad \tilde{t} = \frac{t}{\Delta t}. \quad (2.2.13)$$

З рівняння (2.2.12) одержуємо, що в'язкість для дискретної «ґратчастої» моделі

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{3} \left(\tau - \frac{1}{2} \right) = \frac{2\tau - 1}{6}. \quad (2.2.14)$$

Для розв'язання рівняння (2.2.1) був запропонований метод ґрат Больцмана. Одними з перших робіт, де був розглянутий даний метод, це роботи [84].

Основна ідея методу ґрат Больцмана полягає в тому, що положення часток передбачається дискретним, тобто частка може займати положення тільки у вузлах заданих ґрат. Форма комірок ґрат може бути обрана довільно, але для декартових координат найбільш прийнятні є прямокутні ґрати [84].

При описі ґрат використовуються позначення у вигляді $DiQj$, де i – розмірність ґрат, а j – кількість швидкісних каналів. Для двовимірних задач зазвичай використовуються двовимірні ґрати $D2Q9$ з дев'ятьма швидкісними каналами, а для тривимірних – $D3Q15$ з п'ятнадцятьма [84].

Для дискретних ґрат з кількістю швидкісних каналів рівним j вираз для розрахунку макропараметрів має такий вигляд

$$\begin{aligned} \tilde{\rho} &= \sum_j \tilde{f}_j, \\ \tilde{\rho} \tilde{u} &= \sum_j \tilde{v}_j \tilde{f}_j, \\ \tilde{p} &= \frac{1}{3} \sum_j (\tilde{v}_j - \tilde{u})^2 \tilde{f}_j. \end{aligned} \quad (2.2.15)$$

Для виконання розрахунків за допомогою моделі ґрат Больцмана необхідно визначити вираз для рівноважного розподілу $\tilde{f}^e$, що залежить від обраних просторових ґраток. Розподіл Максвелла (2.2.2) розкладаємо в ряд Тейлора по поточній швидкості потоку $\tilde{u}$, тому що вона набагато менше швидкості молекул ($\tilde{v} \gg \tilde{u}$). Отриманий вираз має вигляд

$$\tilde{f}^e = \tilde{\rho} \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{m\mathfrak{U}^2}{2kT} \right) \left(1 - \frac{\mathfrak{U}^2}{2RT} + \frac{\mathfrak{U} \cdot \mathfrak{U}}{RT} + \frac{\mathfrak{U}^2 \mathfrak{U}^2}{2RT} \right). \quad (2.2.16)$$

Згідно [85] обчислення таких макропараметрів, як щільність, швидкість і енергія в тривимірному просторі еквівалентно обчисленню інтеграла

$$I = \int \psi(\mathfrak{U}) \tilde{f}^e d\mathfrak{U} = \tilde{\rho} \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \int \psi(\mathfrak{U}) \exp \left(-\frac{m\mathfrak{U}^2}{2kT} \right) \left(1 - \frac{\mathfrak{U}^2}{2RT} + \frac{\mathfrak{U} \cdot \mathfrak{U}}{RT} + \frac{\mathfrak{U}^2 \mathfrak{U}^2}{2RT} \right) d\mathfrak{U}, \quad (2.2.17)$$

де $\psi(\mathfrak{U})$ є поліноміальною функцією від $\mathfrak{U}$.

Для ґрат D2Q9, прийнемо функцію $\psi(\mathfrak{U})$ у вигляді

$$\Psi_{m,n}(\mathfrak{U}) = \mathfrak{U}_x^m \mathfrak{U}_y^n, \quad (2.2.18)$$

де $\mathfrak{U}_x$ й $\mathfrak{U}_y$ - просторові x і y компоненти швидкості молекул $\mathfrak{U}$ відповідно.

Після підстановки (2.2.18) в (2.2.17) інтеграл (2.2.17) набуде вигляду

$$I = \frac{\tilde{\rho}}{\pi} \left(\sqrt{2RT} \right)^{m+n} \left\{ \left(1 - \frac{\mathfrak{U}^2}{2RT} \right) I_m I_n + \frac{2(\mathfrak{U}_x I_{m+1} I_n + \mathfrak{U}_y I_m I_{n+1})}{\sqrt{2RT}} + \frac{\mathfrak{U}_x^2 I_{m+2} I_n + 2\mathfrak{U}_x \mathfrak{U}_y I_{m+1} I_{n+1} + \mathfrak{U}_y^2 I_m I_{n+2}}{RT} \right\}, \quad (2.2.19)$$

де

$$I_m = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\zeta^2} \zeta^m d\zeta, \quad \zeta = \frac{\mathfrak{U}}{\sqrt{2RT}}. \quad (2.2.20)$$

Використовуючи формулу Ерміта для інтегрування, одержимо

$$I_m = \sum_{j=1}^3 \omega_j \zeta_j^m. \quad (2.2.21)$$

Для трьох значень змінної ζ

$$\zeta_1 = -\sqrt{3/2}, \quad \zeta_2 = 0, \quad \zeta_3 = \sqrt{3/2}, \quad (2.2.22)$$

вагові коефіцієнти будуть мати наступні значення

$$\omega_1 = \frac{\sqrt{\pi}}{6}, \quad \omega_2 = 2 \frac{\sqrt{\pi}}{3}, \quad \omega_3 = \frac{\sqrt{\pi}}{6}. \quad (2.2.23)$$

Таким чином, інтеграл (2.2.19) набуде наступного вигляду

$$I = \frac{\tilde{\rho}}{\pi} \sum_{i,j=1}^3 \omega_i \omega_j \psi(\tilde{v}_{i,j}) \left[1 + \frac{(\tilde{v}_{i,j} \cdot \tilde{u})}{RT} + \frac{(\tilde{v}_{i,j} \cdot \tilde{u})^2}{2(RT)^2} - \frac{\tilde{u}^2}{2RT} \right], \quad (2.2.24)$$

де $\tilde{v}_{i,j} = (\tilde{v}_i, \tilde{v}_j) = \sqrt{2RT} (\zeta_i, \zeta_j)$.

Отже, порівнюючи вирази (2.2.15) і (2.2.24), функцію рівноважного розподілу можна записати у вигляді

$$\tilde{f}_{i,j}^e = \frac{\omega_i \omega_j}{\pi} \tilde{\rho} \left[1 + \frac{(\tilde{v}_{i,j} \cdot \tilde{u})}{RT} + \frac{(\tilde{v}_{i,j} \cdot \tilde{u})^2}{2(RT)^2} - \frac{\tilde{u}^2}{2RT} \right]. \quad (2.2.25)$$

Визначимо координати положень решіток для кожного з напрямків j і кутів Θ , що відповідають напрямкам

$$e_j = \begin{cases} (0,0), & j=0 \\ (\cos \Theta_j, \sin \Theta_j)c, & \Theta_j = (j-1)\pi/2, \quad j=1,2,3,4 \\ \sqrt{2}(\cos \Theta_j, \sin \Theta_j)c, & \Theta_j = (j-5)\pi/2 + \pi/4, \quad j=5,6,7,8 \end{cases} \quad (2.2.26)$$

або

$$e_j = \begin{cases} (0,0) & j=0 \\ (1,0)c, (0,1)c, (-1,0)c, (0,-1)c & j=1,2,3,4 \\ (1,1)c, (-1,1)c, (-1,-1)c, (1,-1)c & j=5,6,7,8 \end{cases}. \quad (2.2.27)$$

Значення вагових коефіцієнтів для кожного напрямку

$$w_j = \begin{cases} 4/9, & j=0 \\ 1/9, & j=1,2,3,4 \\ 1/36, & j=5,6,7,8 \end{cases} \quad (2.2.28)$$

Тоді, з огляду на вираз для швидкості звуку в ґратах

$$RT = c_s^2 = \frac{c^2}{3}, \quad (2.2.29)$$

одержано вираз для рівноважного розподілу часток при використанні ґрат D2Q9

$$\tilde{f}_j^e = w_j \tilde{\rho} \left[1 + \frac{3(e_j \cdot \tilde{u})}{c^2} + \frac{9(e_j \cdot \tilde{u})^2}{2c^4} - \frac{3\tilde{u}^2}{2c^2} \right]. \quad (2.2.30)$$

Для тривимірного моделювання зазвичай використовуються ґрати D3Q15.

Аналогічно перетворень (2.2.17) – (2.2.24) для решітки $D2Q9$, визначимо координати положень решіток для кожного з напрямків тривимірних грат $D3Q15$

$$e_j = \begin{cases} (0,0,0), & j=0 \\ (\pm 1,0,0)c, (0,\pm 1,0)c, (0,0,\pm 1)c, & j=1,2,\dots,6 \\ (\pm 1,\pm 1,\pm 1)c, (\pm 1,\pm 1,\mp 1)c, (\pm 1,\mp 1,\pm 1)c, (\mp 1,\pm 1,\pm 1)c & j=7,8,\dots,14 \end{cases} \quad (2.2.31)$$

Значення вагових коефіцієнтів для тривимірних грат $D3Q15$

$$w_j = \begin{cases} 2/9, & j=0 \\ 1/9, & j=1,2,\dots,6 \\ 1/72, & j=7,8,\dots,14 \end{cases} \quad (2.2.32)$$

Рівняння Больцмана в наближенні BGK для енергії можна представити в такий спосіб

$$\frac{\partial \tilde{g}}{\partial \tilde{t}} + \mathfrak{V}_i \cdot \frac{\partial \tilde{g}}{\partial \tilde{x}_i} = \frac{1}{\tilde{\tau}_T} (\tilde{g}^e - \tilde{g}), \quad (2.2.33)$$

де рівноважний розподіл енергії $\tilde{g}^e$ відповідає розподілу Максвелла. Вираз для розрахунку енергії на решітках швидкісних каналів має вигляд $\tilde{\rho}e = \sum_j \tilde{g}_j$, де рівноважний розподіл енергії для решіток $D2Q9$ можна визначити по формулах

$$\tilde{g}_j^e = \begin{cases} -\frac{3\tilde{u}^2}{2c^2}, j=0 \\ w_j \tilde{\rho} \left[\frac{3}{2} + \frac{3(e_j \cdot \tilde{u})}{2c^2} + \frac{9(e_j \cdot \tilde{u})^2}{2c^4} - \frac{3\tilde{u}^2}{2c^2} \right], j=1,2,3,4 \\ w_j \tilde{\rho} \left[3 + \frac{6(e_j \cdot \tilde{u})}{c^2} + \frac{9(e_j \cdot \tilde{u})^2}{2c^4} - \frac{3\tilde{u}^2}{2c^2} \right], j=5,6,7,8 \end{cases} \quad (2.2.34)$$

а вагові коефіцієнти для кожного напрямку розраховуються на основі виразу (2.2.28).

Температуропровідність середовища визначається виразом:

$$\tilde{\alpha} = 2\tau_T c^2. \quad (2.2.35)$$

2.3. Метод молекулярної динаміки

Метод молекулярної динаміки (далі MDM) розвивався двома шляхами:

- у першому випадку (класичний метод) – метод дозволяє обчислити траєкторію атомів і зводиться до аналітичного вирішення задачі двочасткового розсіювання. Але, аналітичне рішення ускладнюється навіть для трьох частинок. Як приклад, проста хімічна реакція $\text{H} + \text{H}_2 = \text{H}_2 + \text{H}$ вирішувалась Гіршфельдер Дж., Айрінг Х., Топлі Б. в 1936 році, була спроба розрахувати декілька кроків уздовж однієї з траєкторій. На комп'ютері це стало можливо через 30 років, класичний метод був підтриманий напівкласичними і квантовохімічними розрахунками [86];

- другий шлях розвитку методу молекулярної динаміки - це дослідження термодинамічних і динамічних властивостей речовин (систем). Підґрунтям для розвитку даного шляху молекулярної динаміки стали роботи Ван-дер-Ваальса і Больцмана. Одна з перших робіт у 1957 році, присвячена моделюванню методом молекулярної динаміки [87]. У роботі досліджено фазову діаграму системи твердих сфер, зокрема області рідини і твердого тіла. В системах твердих сфер частинки взаємодіють безпосередньо при зіткненні і рухаються, як вільні частки між зіткненнями. Данні обчислення проведено на комп'ютерах UNIVAC і на IBM 704.

Один з перших прикладів моделювання з безперервним потенціалом, з застосуванням методу кінцевих різниць для інтегрування. Для обчислень використовували IBM 704 і один крок виконувався близько однієї хвилини [88].

Метод молекулярної динаміки ґрунтується на чисельному рішенні класичних рівнянь Ньютона для системи взаємодіючих частинок

$$m_i \mathbf{a}_i = \mathbf{F}_i(\mathbf{r}_i), i = 1 \dots n, \quad (2.3.1)$$

де m - маса прискорення атому, $\mathbf{a}$ - прискорення атому, $\mathbf{r}$ - координати атому, $\mathbf{F}$ - сукупність сил діючих на атом, n - загальна кількість атомів.

За допомогою використання потенціалу Леннарда-Джонса було обчислено фазову діаграму аргону [89], також змодельовано кореляційні функції для перевірки теорії рідкого стану. У цій роботі представлено відому процедуру «Verlet neighbor list» - збереження обчислювальних ресурсів. Також, автор представив новий метод чисельного інтегрування рівнянь руху [89]

$$\mathbf{r}(t + \Delta t) = \mathbf{r}(t) + \Delta t \mathbf{v}(t + \frac{1}{2} \Delta t), \quad (2.3.2)$$

$$\mathbf{v}(t + \frac{1}{2} \Delta t) = \mathbf{v}(t - \frac{1}{2} \Delta t) + \Delta t \frac{\mathbf{F}(t)}{m},$$

$$\mathbf{F}_j = -\frac{1}{r_{ij}} \left[\frac{\partial}{\partial r_{ij}} U(r_{ij}) \right] \mathbf{r}_{ij}$$

U - це сума всіх взаємодій, що діють на частинку.

$$U = U_b + U_\vartheta + U_\phi + U_\omega + U_{LJ} + U_{el} + U_{hb} \quad (2.3.3)$$

де доданки відповідають наступним типам взаємодій: U_b – хімічним зв'язкам; U_ϑ - валентним кутам; U_ϕ - торсійним кутам; U_ω - плоским групам; U_{LJ} - ван-дер-вальсовим контактам; U_{el} - електростатиці; U_{hb} - водневим зв'язкам.

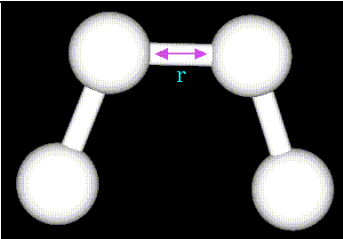
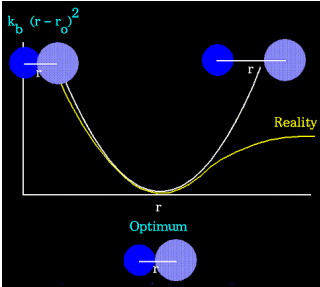
Перелік взаємодій що діють на частинку і їх фізичний зміст представлено в таблиці. 2.1.

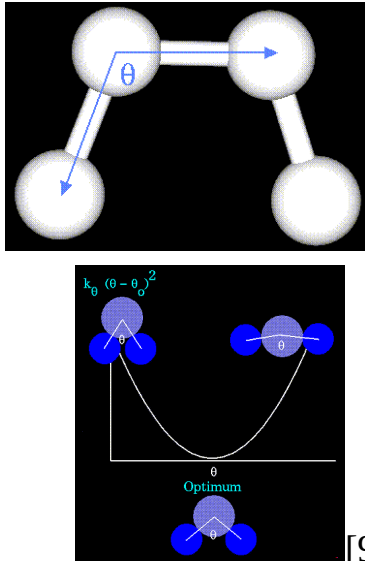
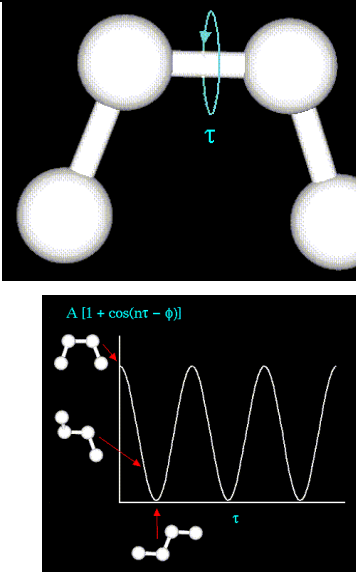
На сьогоднішній день алгоритми програмного забезпечення дозволяють проводити моделювання динаміки молекулярних систем, що налічують мільйони частинок при різноманітних параметрах процесу який відтворюється [95]. Такі, розрахунки ґрунтуються на умовах врахування парної взаємодії окремих атомів та розвиненій на цій базі методу MDM [96-98]. Моделювання реальних фізичних систем - кристалів, біологічних молекул, при застосуванні MDM, є перспективним напрямком досліджень [99]. Перевагою застосування MDM є оптимальний вибір потенціалів взаємодії, який визначає еволюцію системи [100,101]. Адекватний вибір потенціалу взаємодії і оптимізація його параметрів дуже важливі, наприклад,

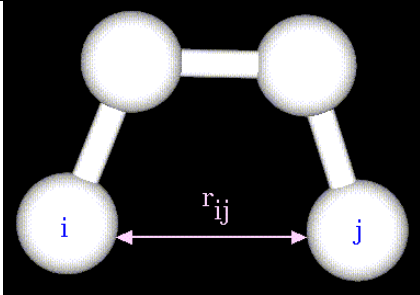
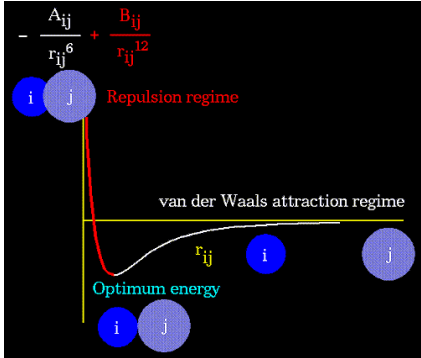
для моделювання міжфазних гетерогенних процесів [102]. Труднощі експериментального вивчення пов'язані у великій кількості можливих конфігурацій системи.

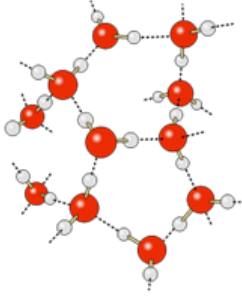
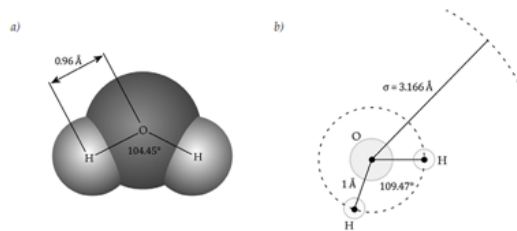
Метод класичної MDM дозволяє вирішувати задачі моделювання просторових перетворень білків і нуклеїнових кислот, але не дозволяє розглядати хімічні перетворення, що відбуваються в системі. Тобто, метод розглядає конфігурацію тільки в рамках існуючих міжатомних зв'язків [94]. Один із перспективних напрямів розвитку MDM, в рамках якого можна моделювати розриви і утворення хімічних зв'язків в біомолекулярній системі, орієнтується на використання гібридного методу квантової і молекулярної механіки для обчислень енергій і сил, що діють на атоми [100-102].

Таблиця 2.1. Перелік взаємодій, що впливають на частинку [90-94].

Назва сили	Формула	Фізичний сенс
1	2	3
Валентно (ковалентна) взаємодія: 1.	$U_b = \frac{1}{2} \sum_b K_b (r - b_0)^2$ сумування проводиться по всім хімічним зв'язкам: b_0 - позначення рівноважних валентних довжин, r - поточні довжини зав'язків, K_b - відповідні силові константи.	 

1	2	3
2.	$U_b = \frac{1}{2} \sum_{\vartheta} K_{\vartheta} (\vartheta - \vartheta_0)^2$ ϑ_0 - рівноважні значення кутів, ϑ - їх поточні значення, K_{ϑ} - силові константи.	 [90,92] [90]
3. Енергія торсіонних взаємодій (обертання атомних груп навколо одинарних хімічних зв'язків) і потенціалів, що відповідають плоским групам, записуються в однаковому вигляді:	$U_{\phi} = \sum_{\phi} K_{\phi} [\cos(n\phi - \delta) + 1]$ n - кратність торсіонного бар'єру, δ - зсув фази, K_{ϕ} визначають висоти потенційних бар'єрів двогранних кутів ϕ.	 [90,92] [90,93]

1	2	3
Невалентна взаємодія: 1. Ван-дер-вальсові взаємодії атомів, розділених трьома і більш валентними зв'язками, описуються потенціалами Леннарда - Джонса:	$U_{LJ} = 4 \sum_{i,j} \varepsilon \left(\left(\frac{\sigma_{ij}}{r_{ij}} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma_{ij}}{r_{ij}} \right)^6 \right)$ r_{ij} - відстань між даними атомами, ε - мінімальна енергія взаємодії (глибина потенційної ями), σ_{ij} - мінімальна відстань між атомами.	 [90,94]  [90]
2. Електричні взаємодії задаються кулонівським потенціалом	$U_{el} = \sum_{i,j} \frac{q_i q_j}{4 \varepsilon_0 r_{ij}}$ q_i, q_j - парціальні заряди на атомах не кратні заряду електрона, які виникають через те, що атоми одних елементів прагнуть притягнути до себе електронну пару ковалентного зв'язку сильніше, ніж атоми інших елементів, ε_0 - діелектрична проникність середовища.	

1	2	3
3. Водневий зв'язок - невалентна взаємодія між атомом водню Н, ковалентно пов'язаним з атомом групи А-Н молекули RA-Н, і електронегативним атомом В іншої молекули (або функціональної групи тієї ж молекули) BR'. Результатом таких взаємодій є комплекси RA-Н...BR' різного ступеня стабільності, в яких атом водню виступає в ролі «мосту», що зв'язує фрагменти RA та BR'.	$U_{hb} = \sum_{i,j} \left(\left(\frac{A}{r_{ij}} \right)^{12} - \left(\frac{B}{r_{ij}} \right)^{10} \right)$ атом групи А-Н молекули RA-Н, електронегативний атом В іншої молекули (або функціональної групи тієї ж молекули) BR'. Результатом таких взаємодій є комплекси RA-Н...BR' різного ступеня стабільності	 [90]  [90]

2.4. Метод дисипативних часток

У цьому розділі представлено огляд методу дисипативної динаміки частинок (далі, DPD). У DPD рідина складається з ряду точкових (квазі) частинок у безперервному просторі [103]. Частинка i характеризується своїм положенням r_i , швидкістю v_i і масою m_i . Для простоти маси всіх частинок зазвичай вибирають однаковими і рівними приведеній одиниці маси $m_i = m \equiv 1$.

1. Рух частинок регулюється рівняннями Ньютона

$$\begin{aligned}\frac{dr_i}{dt} &= v_i, \\ \frac{dv_i}{dt} &= F_i\end{aligned}\tag{2.4.1}$$

де t - час, F_i - сила, що діє на частинку через присутність інших частинок. Можна побачити подібність з іншими методами моделювання на основі частинок, такими як Molecular Dynamics [104,105]. Особливістю DPD є визначення міжчастинкових сил. Сила розділена на попарні внески від консервативного, дисипативні та випадкові сили, відповідно [103]

$$F_i = \sum_{j \neq i} (F_{ij}^C + F_{ij}^D + F_{ij}^R)\tag{2.4.2}$$

Усі сили між частинками i та j прямують до нуля за деяким граничним радіусом r_c , який зазвичай також вибирають як скорочену одиницю довжини, $r_c \equiv 1$.

Консервативна сила визначає термодинаміку системи DPD і визначається м'яким відштовхуванням

$$F_{ij}^C = \begin{cases} a_{ij}(1 - r_{ij})\widehat{r}_{ij} & (r_{ij} \leq 1) \\ 0 & (r_{ij} > 1), \end{cases}\tag{2.4.3}$$

де a_{ij} - максимальна сила відштовхування між частинками i та j , і $r_{ij} = r_i - r_j$, $r_{ij} = |r_{ij}|$, $\widehat{r}_{ij} = r_{ij}/r_{ij}$. Силі (2.4.3) відповідає наступний парний потенціал

$$u(r_{ij}) = \begin{cases} (a_{ij}/2)(1 - r_{ij})^2 & (r_{ij} \leq 1) \\ 0 & (r_{ij} > 1). \end{cases} \quad (2.4.4)$$

Дисипативні та випадкові сили задані як

$$\mathbf{F}_{ij}^D = -\gamma w^D(r_{ij})(\widehat{\mathbf{r}}_{ij} \cdot \mathbf{v}_{ij})\widehat{\mathbf{r}}_{ij} \quad (2.4.5)$$

$$\mathbf{F}_{ij}^R = \sigma w^R(r_{ij})\theta_{ij}\widehat{\mathbf{r}}_{ij} \quad (2.4.6)$$

де γ - інтенсивність дисипації, σ - інтенсивність шуму, w^D і w^R - залежні вагові функції, $v_{ij} = v_i - v_j$, а θ_{ij} - член «білого шуму» Гауса з такими властивостями: $\theta_{ij} = \theta_{ji}$, $\theta_{ij}(t) = 0$, $\langle \theta_{ij}(t)\theta_{kl}(t') \rangle = (\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk})\delta(t - t')$.

Вибір вагових функцій не визначений методом, але П. Еспаньол і П. Воррен [103] показали, що вони повинні бути пов'язані відповідно до

$$w^D(r) = (w^R(r))^2 \quad (2.4.7)$$

для того, щоб система DPD мала чітко визначений стан рівноваги, що підкоряється статистиці Больцмана. Якщо рівняння (2.4.7) рівноважна температура визначається [107] як $k_B T = \sigma^2 / (2\gamma)$ ($k_B T$ зазвичай вибирається як приведена одиниця енергії). Для простоти (та з історичних причин) вагові функції зазвичай вибираються подібними до форми консервативної сили, тому

$$w^R(r) = \sqrt{w^D(r)} = \begin{cases} 1 - r & (r \leq 1) \\ 0 & (r > 1) \end{cases} \quad (2.4.8)$$

Дисипативні та випадкові сили мають два ефекти:

- вони діють як термостати, альтернативний термостат DPD був запропонований С.П. Лове [106];

- вони дозволяють регулювати транспортні властивості, такі як в'язкість, без зміни термодинаміки рівноваги.

Всі сили вважаються попарно адитивними, центральними та задовольняють третій закон Ньютона, таким чином зберігаючи лінійний і кутовий момент. Сили залежать лише від взаємних положень і швидкостей, що робить модель інваріантною.

РОЗДІЛ 3.

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ ТА ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ МОБІЛЬНОГО ТЕПЛОВОГО АКУМУЛЮВАННЯ

3.1. Моделювання процесів теплообміну всередині «теплого ядра» заповненого матеріалом з фазовим переходом

Метою роботи є моделювання процесу теплообміну, що відбувається в коаксіальній трубі – «тепловому ядрі», яка заповнена матеріалом здатним до фазового переходу. Проведене моделювання дозволило теоретично дослідити зміну температури матеріалу з фазовим переходом (далі РСМ) при нагріванні/охолодженні та розподіл температури по ширині циліндра «теплого ядра», а також підтвердило доцільності використання «теплого ядра» заповненого матеріалом з фазовим переходом в акумуляторах ємнісного типу [109,110], що встановлені в дослідному зразку МТА-0,5МВт.

Для досягнення поставленої мети, сформульовано наступні задачі [110]:

- виведення рівняння нагрівання охолодженого РСМ всередині «теплого ядра» враховуючи радіальне перенесення теплоти в будь-якій i -й зоні;
- дослідити залежності теплоємності РСМ від температури враховуючи зміну теплоємності по косинусоїдальному закону;
- порівняти аналітичні результати з отриманими практичними результатами досліджень;
- надати рекомендації щодо практичного впровадження результатів досліджень.

Постановка задачі. Теплова вставка у вигляді коаксіальної труби, далі «тепле ядро» має вигляд двох вертикальних порожнистих співвісних металевих циліндрів типу «труба в трубі». Висота циліндрів H . Радіус

внутрішнього циліндра R_{tb1} , радіус зовнішнього циліндра - R_{tb2} . Товщина стінки циліндрів δ_m . Об'єм між внутрішнім і зовнішнім циліндрами заповнюється гарячим розплавом РСМ до висоти $H_p < H$. Після охолодження розплав РСМ переходить в стан суцільної твердої речовини з температурою T_{p0} яка дорівнює температурі холодної води, яка 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 твердого РСМ в середині «теплого ядра» [110].

По мірі нагрівання в певному інтервалі температур відбувається плавлення парафінових фракцій РСМ, що супроводжується поглинанням додаткової кількості теплоти на розплавлення твердої фази. Кількість енергії, затраченої на розплавлення твердої фази, це прихована теплота фазового переходу процесу плавлення [109,110].

В даній задачі потрібно визначити, як змінюється з часом температура в будь-якій локальній точці в об'ємі РСМ всередині «теплого ядра», а також розрахувати швидкість зміни ентальпії і, відповідно, середньо-об'ємної температури РСМ в процесі нагрівання теплової вставки до заданої температури [110].

Вирішення задачі виконано у циліндричній системі координат (r, z, θ) . Координата z спрямована вертикально і співпадає з осьюовою лінією циліндрів, а координата r розташована перпендикулярно до поверхні бокової стінки циліндра. Розподіл температур не залежить від кутової координати θ внаслідок осьової симетрії об'єкта. Початок координат (r, z) знаходиться в точці перетину осі циліндра з його нижньої торцевої поверхнею. Схема теплової вставки в різних проекціях наведена на рис 3.1.1.

Припущення [110]:

- в процесах нагрівання-охолодження кількість РСМ в середині кільцевої труби залишається незмінним, тобто густина вважається постійною ($\rho = const$);

- початкова стадія процесів нагрівання або охолодження РСМ всередині теплової вставки визначається кінетикою теплообміну пристінкового шару РСМ з оточуючою водою через поверхню стінки в трубі.

Вважається, що труба має досить велику довжину ($H \gg R_2$), тому межевими ефектами на кінцях труби можна знехтувати. В процесі нагрівання або охолодження РСМ конвективний перенос тепла в осьовому і в радіальному напрямку відсутній. Перенесення тепла в об'ємі РСМ всередині труби здійснюється тільки в радіальному напрямку внаслідок теплопровідності [110].

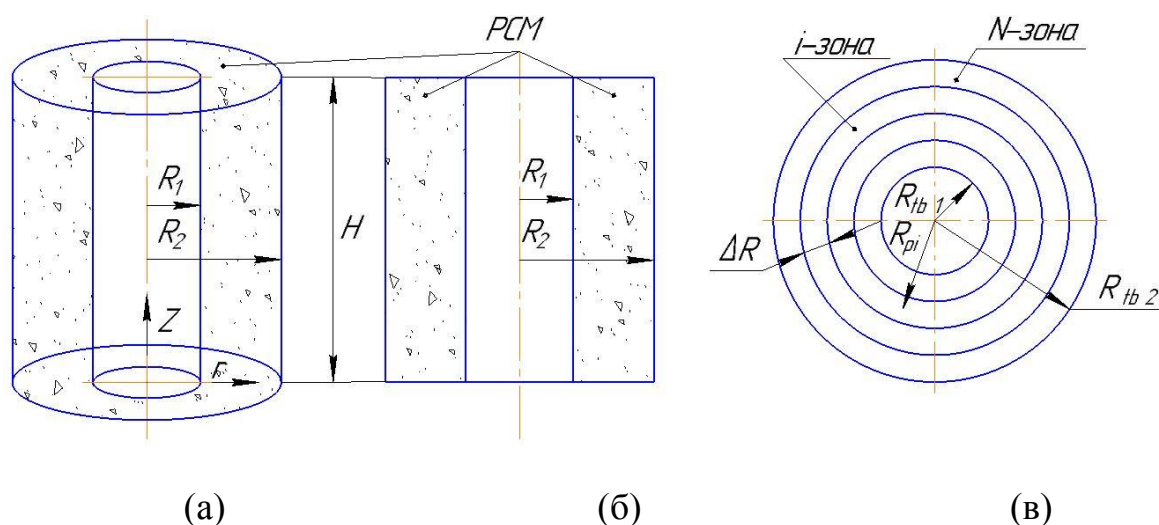


Рис. 3.1.1. Розрахункова схема «теплового ядра»: а - аксонометричне зображення; б - подовжній переріз; в - поперечний переріз [110].

В процесі нагрівання або охолодження «теплового ядра» температура РСМ в будь-який момент часу залежить тільки від координати r і не залежить від координати z .

Об'єктом досліджень є матеріал здатний до фазового переходу, який заповнює «теплове ядро». В результаті попередніх досліджень було відібрано

зразки озокериту, петролатуму і церезину, після експериментальних досліджень викладених в [111-113] для заповнення «теплого ядра» було обрано церезин. Тобто, у якості РСМ обрано церезин, саме цей матеріал розташовано у «тепловому ядрі» дослідного зразка мобільного теплового акумулятору МТА-0,5МВт.

3.1.1. Розділення труби на поздовжні кільцеві зони

Поперечний переріз труби, в якій міститься РСМ, вздовж усієї довжини має форму круглого кільця з внутрішнім радіусом R_{tb1} і зовнішнім радіусом R_{tb2} . Ширина стінки труби $\Delta R_{tb} = R_{tb2} - R_{tb1}$.

Площа поперечного перерізу труби визначається як

$$S_{tbz} = \pi(R_{tb2}^2 - R_{tb1}^2). \quad (3.1.1)$$

Розділимо площу поперечного перерізу труби на N елементарних кільцевих зон шириною $\Delta R = \Delta R_{tb}/N$ і першою зоною будемо вважати зону, прилеглу до внутрішньої поверхні труби. Очевидно, зовнішній радіус кожної зони є внутрішнім радіусом наступної зони. Внутрішній радіус першої елементарної зони дорівнює внутрішньому радіусу труби R_{tb1} . Зовнішній радіус першої елементарної зони, а зовнішній радіус будь-якої i -ї елементарної зони

$$R_{pi} = R_{tb1} + i \cdot \Delta R. \quad (3.1.2)$$

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

Площа поперечного перерізу будь-якої i -ї елементарної зони труби визначається за виразом

$$\begin{aligned} S_{pzi} &= \pi R_{pi}^2 - \pi R_{p(i-1)}^2 = \pi \Delta R \cdot (2R_{pi} - \Delta R) = \\ &= \pi \Delta R \cdot [2R_{tb1} + (2i - 1)\Delta R], \end{aligned} \quad (3.1.3)$$

Об'єм будь-якої i -ї елементарної зони з висотою Δz визначається як добуток площі її поперечного перерізу S_{pi} на висоту елементарного шару Δz . Тоді об'єм i -ї зони можна розрахувати за виразом

$$V_{pi} = \pi \Delta R \cdot (2R_{pi} - \Delta R) \cdot \Delta z = \pi \Delta R \cdot [2R_{tb1} + (2i - 1)\Delta R] \cdot \Delta z. \quad (3.1.4)$$

Площа зовнішньої бокової поверхні елементарної кільцевої зони на елементі довжини Δz будемо визначати за виразом

$$S_{pri} = 2\pi R_{pi} \cdot \Delta z. \quad (3.1.5)$$

Площа зовнішньої поверхні кожної елементарної зони тотожно дорівнює площі внутрішньої поверхні наступної елементарної зони.

3.1.2. Виведення рівняння нагрівання охолодженого РСМ всередині «теплового ядра»

Рівняння нестационарного переносу тепла шляхом теплопровідності в радіальному напрямку в циліндричних координатах, має вигляд

$$\rho c_p \frac{\partial T_p}{\partial \tau} = \frac{\lambda_p}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_p}{\partial r} \right) \quad (3.1.6)$$

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 [110].

Тепловий потік, або кількість тепла, що проходить в одиницю часу через одиницю площі в напрямку r , визначається співвідношенням

$$q_r = -\lambda \frac{dT_p}{dr}, \quad (3.1.7)$$

а кількість теплоти, що проходить в одиницю часу через площі бічної поверхні циліндра висотою Δz , визначається як

$$Q_{pr} = -2\pi R_p \Delta z \cdot \lambda \frac{dT_p}{dr}. \quad (3.1.8)$$

З урахуванням формули (3.1.7) рівняння (3.1.6) для нестационарного переносу тепла в радіальному напрямку шляхом теплопровідності в циліндричних координатах можна записати через тепловий потік q_r

$$\rho c_p \frac{\partial T_{pi}}{\partial \tau} = -\frac{1}{r} \frac{\partial(r q_r)}{\partial r}. \quad (3.1.9)$$

Використовуючи рівняння (3.1.9), розглянемо перенесення тепла в радіальному напрямку в елементарній кільцевій зоні, між перетинами z і $(z + \Delta z)i$.

Температуру на зовнішній поверхні i -ї зони ($1 \leq i \leq N$), яка визначає температуру в об'ємі i -ї зони, позначимо T_{pi} . Очевидно, що 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 зони ($i = N$) дорівнює температурі зовнішній 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 з урахуванням формули (3.1.5) визначається як

$$Q_{pri}^+ = 2\pi\Delta z \cdot \lambda_p \frac{(T_{p(i-1)} - T_{pi})}{\Delta R} R_{p,i-1}. \quad (3.1.10)$$

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

$$Q_{pri}^- = 2\pi\Delta z \cdot \lambda_p \frac{(T_{pi} - T_{p(i+1)})}{\Delta R} R_{p,i}. \quad (3.1.11)$$

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 [110].

$$\begin{aligned}\Delta Q_{pri} &= q_{pri}^+ - q_{pri}^- = \\ &= \frac{2\pi\Delta z \cdot \lambda_p}{\Delta R} [(T_{p(i-1)} - T_{pi})R_{p(i-1)} - (T_{pi} - T_{p(i+1)})R_{pi}].\end{aligned}\quad (3.1.12)$$

Рівняння (3.1.12) описує зміну кількості тепла в одиниці часу в i -й елементарній кільцевій зоні виразом з висотою Δz , яку представлено правою частиною рівняння (3.1.9) і рівняння (3.1.10).

Стосовно до переносу тепла в i -й елементарній кільцевій зоні виразом з висотою Δz рівняння (3.1.6) записується у вигляді

$$\frac{d(\Delta m_{pi} \cdot c_p \cdot T_{pi})}{d\tau} = \frac{2\pi\Delta z \cdot \lambda}{\Delta R} [(T_{p(i-1)} - T_{pi})R_{p(i-1)} - (T_{pi} - T_{p(i+1)})R_{pi}]. \quad (3.1.13)$$

де $\Delta m_{pi} = \rho_{pi} \cdot V_{pi}$ – маса РСМ в елементарній i -й зоні; V_{pi} – об'єм i -й зони; $\rho_p = \text{const}$ – густина РСМ; $c_p = f(T_p)$ – питома теплоємність РСМ, яка залежить від температури. Виконаємо перетворення в лівій частині (3.1.13)

$$\begin{aligned}\frac{d(\Delta m_{pi} \cdot c_p \cdot T_{pi})}{d\tau} &= \frac{V_{pi}\rho_p d(c_p T_{pi})}{d\tau} = V_{pi}\rho_p \left(c_p \frac{dT_{pi}}{d\tau} + \frac{dc_p}{d\tau} T_{pi} \right) = \\ &= V_{pi}\rho_p \left(c_p \frac{dT_{pi}}{d\tau} + \frac{dc_p}{dT_p} \frac{dT_{pi}}{d\tau} T_{pi} \right) = \\ &= V_{pi}\rho_p \left(c_p + \frac{dc_p}{dT_p} T_{pi} \right) \frac{dT_{pi}}{d\tau}.\end{aligned}\quad (3.1.14)$$

Двочлен $c_p + \frac{dc_p}{dT_p} T_{pi}$ в правій частині (3.1.13) при будь-якій заданій залежності теплоємності від температури в певному інтервалі температур визначає поточне значення теплоємності в межах цього інтервалу. Таким чином, рівняння переносу теплоти в елементарній i -й зоні; зводиться до остаточного вигляду [110]. Тоді ліву частину рівняння (3.1.13) з урахуванням (3.1.4) можна представити у вигляді

$$\frac{d(\Delta m_{pi} \cdot c_p \cdot T_{pi})}{d\tau} = \pi\Delta R(2R_{pi} - \Delta R) \cdot \Delta z \cdot \rho_p \cdot c_p(T_p) \cdot \frac{dT_p}{d\tau}, \quad (3.1.15)$$

або у вигляді

$$\begin{aligned} \frac{d(\Delta m_{pi} \cdot c_p \cdot T_{pi})}{d\tau} = & \quad (3.1.16) \\ = \pi \Delta R [2R_{tb1} + (2i - 1)\Delta R] \cdot \Delta z \cdot \rho_p \cdot c_p(T_p) \cdot \frac{dT_p}{d\tau}. \end{aligned}$$

3.1.2.1. Радіальне перенесення теплоти в будь-якій i -й зоні окрім першої та останньої

Підставляючи одержаний вираз триманий вираз (3.1.15) в ліву частину рівняння (3.1.13) і скорочуючи обидві частини отриманого рівняння на $2\pi R_{pi} \cdot \Delta R \cdot \Delta z \cdot \rho_p \cdot c_p(T_p)$, одержимо рівняння теплопровідності для i -й зони в остаточній формі

$$\frac{dT_{pi}}{d\tau} = \frac{2\lambda_p [(T_{p(i-1)} - T_{pi})R_{p(i-1)} - (T_{pi} - T_{p(i+1)})R_{pi}]}{(2R_{pi} - \Delta R)\rho_p \cdot c_{pi}(T_{pi}) \cdot (\Delta R)^2}. \quad (3.1.17)$$

Підставляючи з (3.1.2) значення R_{pi} в ліву частину (3.1.17), а потім значення $R_{p(i-1)}$ і в праву частину (3.1.17), рівняння (3.1.17) можна представити у формі

$$\begin{aligned} \frac{dT_{pi}}{d\tau} = & \quad (3.1.18) \\ = \frac{2\lambda_p [(T_{p(i-1)} - T_{pi}) \cdot (R_{tb1} + (i-1) \cdot \Delta R) - (T_{pi} - T_{p(i+1)}) \cdot (R_{tb1} + i\Delta R)]}{(2R_{tb1} + (2i-1) \cdot \Delta R) \cdot \rho_p \cdot c_{pi}(T_{pi}) \cdot (\Delta R)^2}. \end{aligned}$$

Рівняння (3.1.17) і (3.1.18) описують нестационарне перенесення тепла в радіальному напрямку в елементарній кільцевій зоні труби в довільному поперечному перерізі. У такій формі рівняння використовуються для визначення зміни кількості теплоти у всіх зонах окрім першої та останньої, тобто для зон з номерами $1 < i < N$ [110].

3.1.2.2. 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} , яка в свою чергу

межує з РСМ, що знаходиться у внутрішньому об'ємі труби, тобто $T_{p1} \equiv T_{tb1}$ [110]. Для визначення радіального перенесення теплоти в першій елементарній зоні рівняння (3.1.18), з використанням тільки радіуса R_{tb1} , можна представити у вигляді

$$\frac{dT_{p1}}{d\tau} = \frac{2\lambda \cdot [(T_{tb1} - T_{p1}) \cdot R_{tb1} - (T_{p1} - T_{p2}) \cdot (R_{tb1} + \Delta R)]}{(2R_{tb1} + \Delta R) \cdot \rho_p \cdot c_{p1}(T_{p1}) \cdot (\Delta R)^2}. \quad (3.1.19)$$

Усереднена температура РСМ, що знаходиться у внутрішній трубі, визначається як $T_{w1} = f(\tau)$. Ця температура може поступово змінюватися з часом. Якщо у РСМ, у внутрішній трубі конвекція відсутня температуру стінки труби $T_{tb1} \cong T_{w1}(\tau)$, і тоді рівняння для першої зони можна представити у вигляді

$$\frac{dT_{p1}}{d\tau} = \frac{2\lambda_p \cdot [(T_{w1} - T_{p1}) \cdot R_{tb1} - (T_{p1} - T_{p2}) \cdot (R_{tb1} + \Delta R)]}{(2R_{tb1} + \Delta R) \cdot \rho_p \cdot c_{p1}(T_{p1}) \cdot (\Delta R)^2}. \quad (3.1.20)$$

Якщо у воді у внутрішній трубі теплової вставки має місце природна або вимушена конвекція, рівняння для першої зони набуває вигляду

$$\begin{aligned} \frac{dT_{p1}}{d\tau} = & \quad (3.1.21) \\ = & \frac{2 \cdot [k_1 \cdot (T_{w1} - T_{p1}) \cdot R_{tb1} \cdot \Delta R - \lambda_p (T_{p1} - T_{p2}) \cdot (R_{tb1} + \Delta R)]}{(2R_{tb1} + \Delta R) \cdot \rho_p \cdot c_{p1}(T_{p1}) \cdot (\Delta R)^2}, \end{aligned}$$

де коефіцієнт теплопередачі k_1 через стінку труби до РСМ, визначається

$$k_1 = \frac{1}{1/\alpha_1 + \delta_m/\lambda_m + \Delta R/\lambda_p}, \quad (3.1.22)$$

де α_1 - коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої поверхні труби до РСМ, при вимушеній або природній конвекції РСМ, всередині теплової вставки; δ_m - товщина стінки труби; λ_m - коефіцієнт теплопровідності матеріалу труби (сталі). В моделі коефіцієнт теплопередачі є заданим параметром [110].

Очевидно, що рівняння (3.1.21) описує перенесення теплоти в першій зоні як при наявності конвекції, так і за її відсутності. В останньому випадку досить прийняти, що в знаменнику правої частини (3.1.22) член $1/\alpha_1 = 0$, і тоді k_1 визначається за формулою

$$k_1 = \frac{\lambda_p}{\Delta R}. \quad (3.1.23)$$

3.1.2.3. 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} , яка знаходиться в термічному контакті з навколишнім об'ємом води в ємності ТА. Як зазначалося вище, температура РСМ в останній зоні T_{pN} приймається рівною температурі внутрішньої поверхні зовнішньої стінки труби T_{tb2} [110].

Підставляючи в (3.1.17) значення ($i = N$), одержимо рівняння радіального перенесення тепла в останній зоні, яке формально записується у вигляді

$$\begin{aligned} \frac{dT_{pN}}{d\tau} = & \quad (3.1.24) \\ = & \frac{2 \cdot [\lambda_p \cdot (T_{p(N-1)} - T_{pN}) \cdot R_{p(N-1)} - k_2(T_N - T_{w2}) \cdot \Delta R \cdot R_{pN}]}{(2R_{pN} - \Delta R) \cdot \rho_p \cdot c_{pN}(T_{pN}) \cdot (\Delta R)^2}, \end{aligned}$$

або у вигляді (3.1.25)

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

де коефіцієнт теплопередачі k_2 через стінку труби до води визначається

$$k_2 = \frac{1}{1/\alpha_2 + \delta_m/\lambda_m}, \quad (3.1.26)$$

де α_2 - коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої поверхні труби до води при вимушеній або природній конвекції води всередині «теплого ядра».

У моделі коефіцієнт теплопередачі α_2 є заданим параметром. Рівняння (3.1.24) описує процес перенесення теплоти в останній зоні як при наявності конвекції, так і при її відсутності [110]. В останньому випадку достатньо прийняти, що в знаменнику правої частини (3.1.26) член $1/\alpha_2 = 0$, і тоді k_2 визначається за формулою

$$k_2 = \frac{\lambda_m}{\delta_m}. \quad (3.1.27)$$

Середня температура об'єму води поблизу зовнішньої стінки «теплого ядра» ємності ТА визначається як $T_{w2} = f(\tau)$. Ця температура поступово змінюється з часом.

3.1.3. Аналітичні залежності теплоємності РСМ від температури

В якості РСМ для застосування в МТА вибрано церезин – це суміш парафіну церезину та олії (масова частка олії – 8,3%). Розглянемо процес нагрівання твердого церезину масою 1 кг від температури 20 °С до 100 °С. Розділимо цей температурний інтервал на сім ділянок, які відрізняються характером зміни від температури величини ентальпії, або ефективного коефіцієнта теплоємності [110].

Відповідно до експериментальних даних в інтервалах температур від $T_0 = 20$ °С до $T_1 = 27,5$ °С, від $T_2 = 50$ °С до $T_3 = 52,5$ °С, від $T_4 = 67,5$ °С до $T_5 = 70$ °С, від $T_6 = 90$ °С до $T_{fin} = 110$ °С спостерігається слабка залежність теплоємності від температури, яку можна апроксимувати прямою лінією без нахилу. Починаючи з $T_1 = 27,5$ °С, спостерігається монотонне

підвищення теплоємності від теплоємності твердого церезину $C_{s0}(20^\circ\text{C})$ до максимального значення C_{max1} при температурі $T_2 = 50^\circ\text{C}$. Отже, в інтервалі температур від $T_1 = 27,5^\circ\text{C}$ до $T_2 = 50^\circ\text{C}$ є ділянка $\Delta T_{12} = T_2 - T_1 = 22,5^\circ\text{C}$, на якій теплоємність церезину різко збільшується до C_{max1} . В інтервалі температур від $T_3 = 52,5^\circ\text{C}$ до $T_4 = 67,5^\circ\text{C}$ є ділянка $\Delta T_{34} = T_4 - T_3 = 15^\circ\text{C}$, на якій теплоємність знижується до проміжного постійного значення C_{max2} . Далі, в інтервалі температур від $T_5 = 70^\circ\text{C}$ до $T_6 = 90^\circ\text{C}$ є ділянка $\Delta T_{56} = T_6 - T_5 = 20^\circ\text{C}$, на якій теплоємність знижується до постійного значення теплоємності рідкого розплаву церезину [110].

Підвищення теплоємності на ділянці ΔT_{12} будемо апроксимувати косинусоїдальною залежністю виду

$$C_{p12}(T) = C_{ps0} + \frac{C_{max1} - C_{ps0}}{2} \cdot \left[1 - \cos\left(\frac{\pi(T - T_1)}{\Delta T_{12}}\right) \right] \quad (3.1.28)$$

для $T_1 \leq T \leq T_2$.

Зниження теплоємності на ділянці ΔT_{34} будемо апроксимувати косинусоїдальною залежністю виду

$$C_{p34}(T) = C_{max1} - \frac{C_{max1} - C_{max2}}{2} \cdot \left[1 - \cos\left(\frac{\pi(T - T_3)}{\Delta T_{34}}\right) \right] \quad (3.1.29)$$

для $T_3 \leq T < T_4$.

Зниження теплоємності на ділянці ΔT_{56} будемо апроксимувати косинусоїдальною залежністю виду

$$C_{p56}(T) = C_{max1} - \frac{C_{max2} - C_{plo}}{2} \cdot \left[1 - \cos\left(\frac{\pi(T - T_5)}{\Delta T_{56}}\right) \right] \quad (3.1.30)$$

для $T_5 \leq T < T_6$.

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 [110]

$$\Delta H_{s0-1} = \int_{T_{s0}}^{T_1} c_0 dT = c_0 \int_{T_{s0}}^{T_1} dT = c_{ps0} (T_1 - T_{s0}). \quad (3.1.31)$$

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

$$\Delta H_{1-2} = \int_{T_1}^{T_2} c_{p12} dT. \quad (3.1.32)$$

Підставимо в (3.1.32) співвідношення для c_{p12} з (3.1.28) і проведемо інтегрування

$$\Delta H_{1-2} = \int_{T_1}^{T_2} c_{p12} dT = \frac{C_{ps0} + C_{max1}}{2} \Delta T_{12}. \quad (3.1.33)$$

На ділянці $\Delta T_{23} = T_2 \div T_3$ підвищення ентальпії визначається як

$$\Delta H_{2-3} = \int_{T_2}^{T_3} c_{max1} dT = c_{max1} \int_{T_2}^{T_3} dT = c_{max1} (T_3 - T_2). \quad (3.1.34)$$

На ділянці $\Delta T_{34} = T_3 \div T_4$ підвищення ентальпії визначається як

$$\Delta H_{3-4} = \int_{T_3}^{T_4} c_{p34} dT. \quad (3.1.35)$$

Підставимо в (3.1.35) вираз для c_{p34} з (3.1.29) і проведемо інтегрування

$$\Delta H_{3-4} = \int_{T_3}^{T_4} c_{p34} dT = \frac{C_{max1} + C_{max2}}{2} \Delta T_{34}. \quad (3.1.36)$$

На ділянці $\Delta T_{45} = T_4 \div T_5$ підвищення ентальпії визначається як

$$\Delta H_{4-5} = \int_{T_4}^{T_5} c_{max2} dT = c_{max2} \int_{T_4}^{T_5} dT = c_{max2} (T_5 - T_4). \quad (3.1.37)$$

На ділянці $\Delta T_{56} = T_5 \div T_6$ підвищення ентальпії визначається як

$$\Delta H_{5-6} = \int_{T_5}^{T_6} c_{p56} dT. \quad (3.1.38)$$

Підставимо в (3.1.38) вираз для c_{p56} з (3.1.30) і проведемо інтегрування

$$\Delta H_{5-6} = \int_{T_5}^{T_6} c_{p56} dT = \frac{C_{max2} + C_{plo}}{2} \Delta T_{56}. \quad (3.1.39)$$

На ділянці $\Delta T_{6f} = T_6 \div T_{fin}$ підвищення ентальпії визначається як

$$\Delta H_{6-fin} = \int_{T_6}^{T_{fin}} C_{plo} dT = C_{plo} \int_{T_6}^{T_{fin}} dT = C_{plo} (T_{fin} - T_6). \quad (3.1.40)$$

У таблиці 3.1 представлені значення параметрів, необхідних для розрахунку температурної залежності теплоємності церезину за рівняннями (3.1.28) - (3.1.30) [110].

Таблиця 3.1. Залежності теплоємності парафіну від температури [110]

Межа температурних інтервалів	T_{z0}	T_{z1}	T_{z2}	T_{z3}	T_{z4}	T_{z5}	T_{z6}	T_{zf}
Темпеатура, °C	20	25	50	52,5	67,5	70	90	110
Температура, К	293	298	323	325,5	340,5	343	363	383
Теплоємність, кДж/кг·К	C_{s0}	C_{s0}	C_{max1}	C_{max1}	C_{max2}	C_{max2}	C_{l0}	C_{l0}
	2,7	2,7	4,87	4,87	3,95	3,95	2,0	2,0

Таблиця 3.2. Залежності ширини температурних інтервалі від зміни температури

Ширина температурних інтервалів, К	ΔT_{z01}	ΔT_{z12}	ΔT_{z23}	ΔT_{z34}	ΔT_{z45}	ΔT_{z56}	ΔT_{z6a}
	5	25	2,5	15	2,5	20	20

На рис. 3.1.2. наведено результати експериментальних (криві 1 і 2) і аналітичних залежностей теплоємності зразка церезину. Церезин, як РСМ для «теплого ядра» було обрано в результаті комплексних досліджень [114-115]. Вибір проводили на основі аналізу представлених на ринку України бюджетних, вибухо-пожежобезпечних матеріалів органічного походження з діапазоном фазового переходу від 40 °C до 90 °C, що відповідає робочим температурам теплового акумулятора. Для досліджень

було відібрано зразки – озокериту, церезину, петролатуму. В результаті експериментальних досліджень зміни питомої теплоємності в зазначеному діапазоні температур при термоцикуванні «нагрів-охолодженні» було встановлено, що деструктивних змін РСМ при 85 термоциклах не виявлено. Закономірності протікання процесів стабільні для всіх трьох РСМ. Однак, експериментально встановлено, що тривалість нагрівання до 90°C церезину найдовша і перевищує в 1,5÷2 рази цей показник для петролатуму і озокериту, оскільки має найвищий показник середньої питомої теплоємності. При охолодженні від 90 °С до 50 °С середня температура церезину є найвищою, що вигідно виділяє даний зразок як шуканий РСМ. Детально проведений комплекс досліджень описано в [115]. Отже, відібраний зразок церезину продовжили нагрівати і охолоджувати. Після завершення 85 циклів повторно дослідили зміни питомої теплоємності в діапазоні температур від 40 °С до 90 °С [111], в результаті отримали високу степінь повторюваності, зміни відбулись у межах 2 % ... 9 %. Це свідчить про доцільність використання церезину у «тепловому ядрі» теплового акумулятор.

На рис. 3.1.3 наведено залежність зміни ентальпії церезину від температури розраховану з рівнянь (3.1.31) – (3.1.40) [110].

З рис. 3.1.2 очевидно що рівняння (3.1.28) – (3.1.30) апроксимують експериментальну залежність $c_p = f(T)$, з достатньою точністю, що дає змогу застосувати цю теоретичну залежність в моделі при розрахунку кінетики нагрівання досліджуваного зразка церезину з урахуванням фазових переходів на стадії плавлення [110].

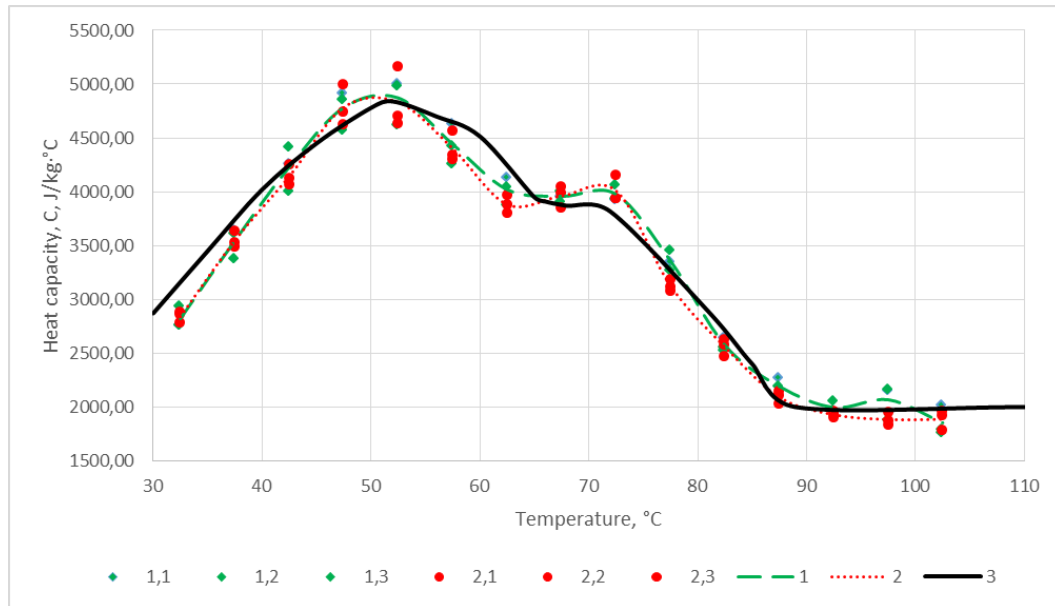


Рис. 3.1.2. Залежність питомої теплоємності зразка церезину від температури:
 1 – результати експериментальних досліджень до термоцикування;
 2 – результати експериментальних досліджень після 85 циклів «нагріву / охолодження»; 3 - розрахункова апроксимація залежності теплоємності від температури [110, 111].

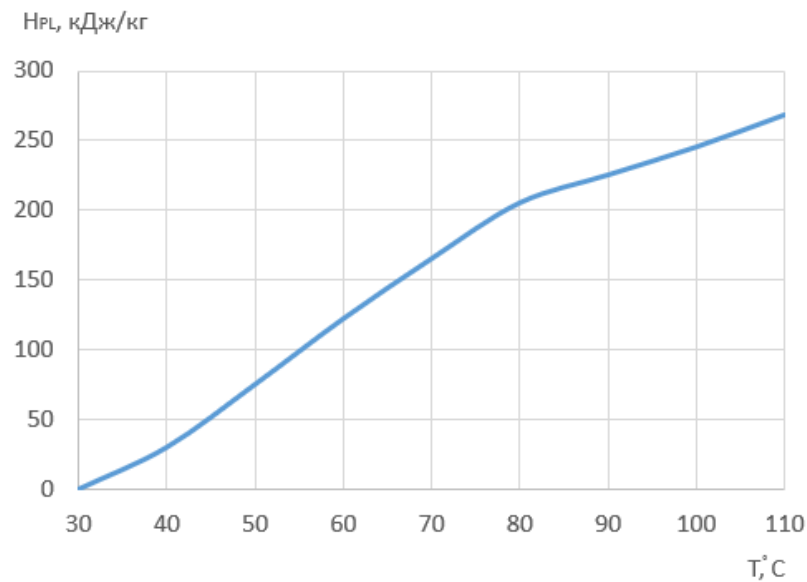


Рис. 3.1.3. Розрахунок зростання ентальпії досліджуваного зразка церезину в процесі нагрівання від температури $T_p = 30^\circ\text{C}$ до $T_p = 110^\circ\text{C}$ [110].

3.1.4. Аналіз тестових результатів розрахунку по моделі

Для апробації моделі було проведено тестовий розрахунковий експеримент з кінетики нагрівання зразка церезину, що досліджувався, в тепловій вставці при заданих режимних параметрах [110].

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

$$T_w = T_{max} - (T_{max} - T_0) \cdot e^{-\beta t}, \quad (3.141)$$

де β - емпіричний коефіцієнт, який визначає швидкість нагрівання води в ємності теплового акумулятору [110].

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 $T_{pl} = [f(r, \tau)]$. В даній тестовій задачі приймалося, що природна та вимушена конвекція на границі зі зовнішньою і внутрішньою поверхнями теплової вставки відсутня а температура РСМ на границі внутрішньої і зовнішньої поверхонь «теплового ядра» в будь-який момент часу має однакове значення ($T_{w1} = T_{w2}$).

Для вирішення задачі по наведеним вище рівнянням математичної моделі кільцева труба з церезином поділялася на 15 елементарних кільцевих зон, так що ширина кожної зони $\Delta R = 1\text{ см}$.

Результати даного розрахункового експерименту наведено на рис. 3.1.4, криві 1-6 ілюструють розподіл температури по радіусу кільцевої труби

через кожну годину з моменту початку нагрівання. З рисунку видно, що якщо за 6 годин нагрівання середня температура води в ємності теплового акумулятора прогрілася до 90°C , то температура церезину в центрі кільцевої труби майже на 20°C холодніша [110].

Аналіз показує, що застосування даної моделі може надати великий об'єм нової корисної інформації стосовно кінетики нагрівання-охолодження маси РСМ в ємності теплового акумулятора і кількість акумульованої або звільненої теплоти в залежності від часу [110].

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 теплової вставки [110].

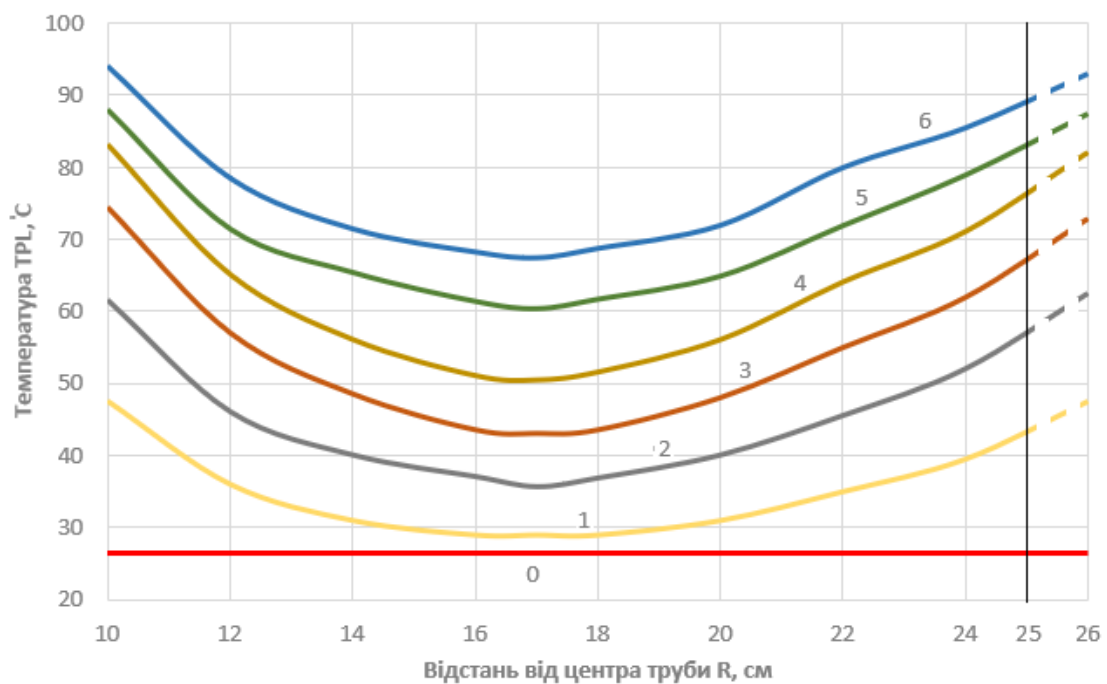


Рис. 3.1.4. Розподіл температури по ширині кільцевої труби з РСМ в процесі нагрівання теплової вставки в різні моменти часу: 0 – до початку нагрівання ($\tau = 0$); 1 – через 1 годину; 2 - через 2 години; 3 - через 3 години; 4 - через 4 години; 5 – через 5 годин; 6 – через 6 годин нагрівання.

Зростання температури всередині «теплового ядра» відбувається внаслідок монотонного нагрівання ємності акумулятора з водою або

теплоакумуючим матеріалом від 27°C до 110°C. Значення температури при $R = 10\text{см}$ відповідає температурі води на границі з внутрішньою поверхнею труби, а значення температури при $R = 26\text{см}$ - температури води на границі зі зовнішньою поверхнею кільцевої труби [110].

Дану методику розрахунку впроваджено в учбовому процесі студентів технічної спеціальності НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. І.Сікорського», Додаток А.

3.2. Стаціонарний і нестаціонарний комплексний теплообмін при плівковому кипінні

3.2.1. Математична модель

Розглядається задача конвективно-радіаційного теплообміну при плівковому кипінні рідини на вертикальній нагрітій стінці, зануреній у великий об'єм води, рис. 3.2.1 Так задача відповідає тепловому процесу, що відбувається в ємності теплового акумулятору між рідиною що знаходиться в акумуляційній ємності заповненій рідиною та «тепловим ядром», «змієвиковим» теплообмінним пристроєм.

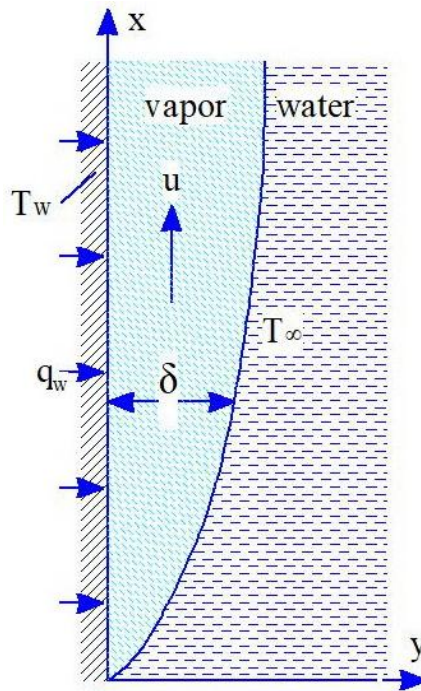


Рис. 3.2.1. Схема кипіння плівки на вертикальній стінці [116].

Декартову систему координат на рис.3.2.1 вибрано таким чином, щоб вісь координат x була розташована вздовж поверхні стіни, вісь координат y була перпендикулярна до стіни, а початок осі y лежав на стіні. Пара в плівці рухається вгору в напрямку збільшення координати x . Оскільки товщина пароподібної плівки δ набагато менша за довжину стінки, модель прикордонного шару можна використовувати для моделювання процесів транспортування в плівці [117,118].

Відповідно до прийнятих модельних припущень, на межі між парою та рідиною при $y = \delta$ температури обох фаз відповідають температурі насичення при даному тиску. Звичайно, температура поверхні стінки перевищує температуру рідини (тобто температуру насичення): $T_w > T_\infty$.

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 також можна знехтувати;
- на межі розділу між паровою плівкою та рідкою фазою ефект тертя та поверхневого натягу незначний;
- звичайно, щільність рідини більш ніж на порядок перевищує щільність пари;
- теплообмінний пристрій має форму «зміївика» при моделюванні прийнято, що це вертикальна труба.

Теплове випромінювання залежить від температури середовища. Розглядається процес стійкого плівкового кипіння без руйнування плівки пари. Стійкість плівкового кипіння було розглянуто у роботі [119]. Отримано критерій стійкості як залежності числа Архімеда від числа Рейнольдса відповідного перебігу рідини. Стійкість плівки забезпечується тим, що критерій стійкості не перевищує критичного значення.

3.2.2. Проблема стаціонарного стану

Рівняння переносу, необхідні для розв'язання задачі, з урахуванням зроблених вище модельних припущень, можна записати в наближенні прикордонного шару

$$\mu \frac{d^2 u}{dy^2} = -g \Delta \rho \quad (3.2.1)$$

$$\lambda \frac{d^2 T}{dy^2} = \frac{dq_r}{dy} \quad (3.2.2)$$

де q_r – густина радіаційного теплового потоку.

Для оптично товстого середовища густина радіаційного теплового потоку визначається співвідношенням [120]

$$q_r = -k_r \frac{dT}{dy} = -\frac{16\sigma T^3}{3\beta} \frac{dT}{dy} \quad (3.2.3)$$

де κ_r – коефіцієнт радіаційної тепловіддачі; β – коефіцієнт поглинання пари (середня поглинальна здатність середовища по спектру). Підстановка рівняння (3.2.3) у рівняння (3.2.2) дає

$$\frac{d}{dy} \left(\left(\lambda + \frac{16\sigma T^3}{3\beta} \right) \frac{dT}{dy} \right) = \frac{d}{dy} \left((\lambda + BT^3) \frac{dT}{dy} \right) = 0 \quad (3.2.4)$$

$$B = \frac{16\sigma}{3\beta}. \quad (3.2.5)$$

де

При розв'язуванні рівнянь будуть розглядатися два типи граничних умов (див. їх детальний опис та інтерпретацію в книзі [121]). Перший з них передбачає відсутність механічної взаємодії між парою і рухомою рідиною, тобто нульові напруги зсуву на межі розділу двох фаз. Іншими словами, рідина рухається зі швидкістю, що дорівнює місцевій швидкості пари. Ці умови вперше були запропоновані Бромлі [122].

Для першого типу граничних умов збільшення масової витрати під час руху пари в плівці внаслідок безперервного кипіння та нового пароутворення описується за допомогою рівняння балансу мас Бромлі [122]

$$dG = \frac{q_w}{L_v} dx. \quad (3.2.6)$$

Другий тип граничних умов, запропонований Елліоном [123], передбачає, що рідина за межами парової плівки (тобто безпосередньо на її зовнішній межі) перебуває в спокої. Припускаючи рідку фазу в стані спокою поза плівкою рідкої пари, Елліон запропонував модифікацію рівняння балансу мас у наступній формі

$$q_w = L_v G_l, \quad (3.2.7)$$

де

$$\int_0^x G_l dx = \int_0^\delta \rho u dy. \quad (3.2.8)$$

Тут G_l позначає масову швидкість потоку в паровій плівці на одиницю

довжини нагрітої поверхні.

Перевагами описаних вище моделей є можливість аналітичного вирішення низки задач кипіння з різними граничними умовами для підведення тепла та потоку рідини у випадку двох оптичних підходів: оптично тонкого та оптично товстого шарів пари. Для обох цих випадків розв'язки кожної з наведених вище граничних умов розглядались окремо.

Для першого типу граничної умови Бромлі [122] (відсутність механічної взаємодії між парою та рухомою рідиною на межі розділу між ними) використовувались граничні умови

$$u = 0, \quad T = T_w, \quad \text{при } y = 0 \quad (3.2.9)$$

$$\left(\frac{du}{dy} \right)_{y=\delta} = 0, \quad T = T_\infty \quad \text{при } y = \delta. \quad (3.2.10)$$

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

$$u = 0, \quad \left(\frac{dT}{dy} \right)_{y=0} = -\frac{q_w}{\lambda_{eff}}, \quad \text{при } y = 0 \quad (3.2.11)$$

$$\left(\frac{du}{dy} \right)_{y=\delta} = 0, \quad T = T_\infty \quad \text{при } y = \delta \quad (3.2.12)$$

де $\lambda_{eff} = \lambda + \lambda_r$ – ефективна теплопровідність.

Як зазначалось вище, другий тип граничних умов, сформульованих Елліоном [123], передбачає, що рідина знаходиться в стані спокою поза паровою плівкою і на межі між обома фазами. Тому є граничні умови для температури і швидкості в шарі пари

$$u = 0, \quad T = T_w \quad \text{при } y = 0 \quad (3.2.13)$$

$$u = 0, \quad T = T_\infty \quad \text{при } y = \delta. \quad (3.2.14)$$

Що стосується першого типу граничних умов, то будемо моделювати випадки постійної температури стінки та постійного теплового потоку на

стіні:

$$u = 0, \quad \left(\frac{dT}{dy} \right)_{y=0} = -\frac{q_w}{\lambda_{eff}}, \quad \text{при } y = 0 \quad (3.2.15)$$

$$u = 0, \quad T = T_\infty \quad \text{при } y = \delta. \quad (3.2.16)$$

3.2.2.1. Модель Бромлі (відсутня механічна взаємодія на межі парарідина)

Умова $T_w = \text{const}$

В результаті інтегрування рівняння (3.2.4) отримуємо

$$\lambda T + \frac{B}{4} T^4 + C_1 y + C_2 = 0, \quad (3.2.17)$$

де константи інтегрування C_1 and C_2 визначаються з граничних умов (3.2.9), (3.2.10).

Розв'язок (3.2.17) з урахуванням граничних умов (3.2.9), (3.2.10) можна перетворити до наступного вигляду

$$\lambda(T + T_w(\eta - 1) - T_\infty \eta) + \frac{B}{4}(T^4 + T_w^4(\eta - 1) - T_\infty^4 \eta) = 0, \quad (3.2.18)$$

де параметр B визначається згідно з рівнянням (3.2.5)

$$\eta = \frac{y}{\delta} \quad (3.2.19)$$

Рівняння (3.2.18) можна переписати в безрозмірному вигляді

$$(\vartheta + (\eta - 1) - \vartheta_\infty \eta) + \frac{4}{3} \text{Sr}_1 (\vartheta^4 + (\eta - 1) - \vartheta_\infty^4 \eta) = 0, \quad (3.2.20)$$

де

$$\vartheta = \frac{T}{T_w}, \quad \vartheta_\infty = \frac{T_\infty}{T_w} \quad (3.2.21)$$

$$\text{Sr}_1 = \frac{\sigma T_w^3}{\beta \lambda} \quad (3.2.22)$$

Sr_1 - є числом Старка, ϑ - безрозмірна температура.

Рівняння (3.2.20) можна розв'язати відносно координати η . Його рішення виглядає

$$\eta = \frac{3(1 - \vartheta) + 4\text{Sr}_1(1 - \vartheta^4)}{3(1 - \vartheta_\infty) + 4\text{Sr}_1(1 - \vartheta_\infty^4)}. \quad (3.2.23)$$

Це рішення показано на рис. 3.2.2.

Як видно, 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 (3.2.23) дозволяє проаналізувати два граничні випадки. Перший – коли конвекція набагато слабша за випромінювання ($\text{Sr}_1 \rightarrow \infty$)

$$\vartheta = \sqrt[4]{1 - \eta(1 - \vartheta_\infty^4)}. \quad (3.2.24)$$

В іншому граничному випадку конвекція переважає над випромінюванням ($\text{Sr}_1 \rightarrow 0$)

$$\vartheta = 1 - \eta(1 - \vartheta_\infty). \quad (3.2.25)$$

Рисунок 3.2.3. ілюструє вплив параметра ϑ_∞ на профілі граничної температури. Тут профілі 1-3 розраховуються відповідно до рівняння (3.2.24) і профілі 4-6 розраховуються за рівнянням (3.2.25).

Як і очікувалося, 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.

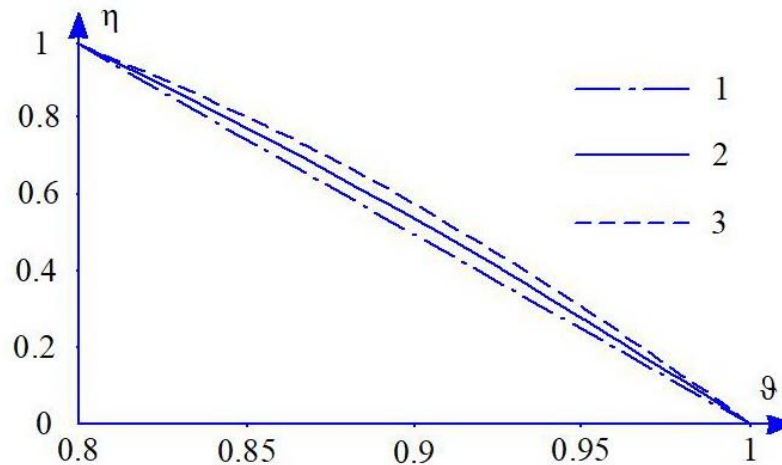


Рис.3.2.2. Профілі температури при $\theta_{\infty} = 0,8$:
1- $Sr_1=0$; 2- $Sr_1=0,3$; 3- $Sr_1=1000$.

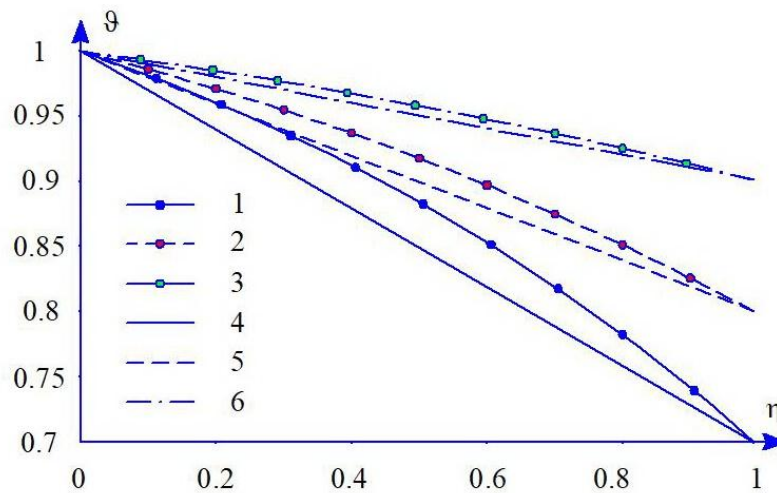


Рис.3.2.3. Профілі граничних температур: 1,4 - $\theta_{\infty}=0,7$; 2,5- $\theta_{\infty}=0,8$; 3,6- $\theta_{\infty}=0,9$.

Беручи похідну від рівняння (3.2.18) отримано

$$\begin{aligned} \lambda(T_w - T_{\infty}) + \frac{B}{4}(T_w^4 - T_{\infty}^4) + \delta(\lambda + BT^3) \frac{dT}{dy} = \\ = \lambda(T_w - T_{\infty}) + \frac{B}{4}(T_w^4 - T_{\infty}^4) + (\lambda + BT^3) \frac{dT}{d\eta} = 0 \end{aligned} \quad (3.2.26)$$

З рівняння (3.2.26) маємо

$$\frac{dT}{dy} = - \frac{\lambda(T_w - T_{\infty}) + \frac{B}{4}(T_w^4 - T_{\infty}^4)}{\lambda\delta + B\delta T^3} \quad (3.2.27)$$

Отже співвідношення для густини теплового потоку має вигляд

$$q = q_w = -(\lambda + BT^3) \frac{dT}{dy} = \frac{\lambda}{\delta} (T_w - T_\infty) + \frac{B}{4\delta} (T_w^4 - T_\infty^4) \quad (3.2.28)$$

Використовуючи рівняння (3.2.6) отримано диференціальне рівняння для товщини шару пари. Для цього потрібно знати рівняння для профілю швидкості. Бромлі [124] отримав профіль швидкості як розв'язок рівняння (3.2.1) з граничними умовами (3.2.9), (3.2.10) у такому вигляді

$$u = \frac{g\Delta\rho\delta^2}{\mu} \left(\frac{y}{\delta} - \frac{y^2}{2\delta^2} \right) \quad (3.2.29)$$

Підстановка рівнянь (3.2.28) і (3.2.29) у рівняння (3.2.6) отримуємо

$$\begin{aligned} \frac{dG}{dx} &= \frac{d}{dx} \left(\int_0^\delta \rho u dy \right) = \frac{d}{dx} \left(\frac{g\rho\Delta\rho\delta^3}{3\mu} \right) = \\ &= \frac{q_w}{L_v} = \frac{1}{\delta L_v} \left(\lambda(T_w - T_\infty) + \frac{B}{4} (T_w^4 - T_\infty^4) \right). \end{aligned} \quad (3.2.30)$$

Інтегрування цього рівняння за граничною умовою

$$\delta = 0 \quad \text{при} \quad x = 0. \quad (3.2.31)$$

В результаті

$$\begin{aligned} \delta &= \sqrt[4]{\frac{4\mu\Delta T x}{gL_v\rho\Delta\rho} \left(\lambda(T_w - T_\infty) + \frac{B}{4} (T_w^4 - T_\infty^4) \right)} = \\ &= \sqrt[4]{\frac{4\lambda(T_w - T_\infty)\mu\Delta T x}{gL_v\rho\Delta\rho} \left(1 + \frac{B}{4\lambda} \frac{T_w^4 - T_\infty^4}{T_w - T_\infty} \right)} = \delta_0 \sqrt[4]{\left(1 + \frac{4}{3} \text{Sr}_2 \right)} \end{aligned} \quad (3.2.32)$$

де

$$\text{Sr}_2 = \frac{\sigma}{\beta\lambda} \frac{T_w^4 - T_\infty^4}{T_w - T_\infty} = \frac{\sigma}{\beta\lambda} (T_w + T_\infty)(T_w^2 + T_\infty^2) \quad (3.2.33)$$

є іншою формою числа Старка, тому

$$\delta_0 = \sqrt[4]{\frac{4\lambda\mu\Delta T x}{gL_v\rho\Delta\rho}}, \quad (3.2.34)$$

де δ_0 – товщина шару пари без випромінювання.

Тепер можливо знайти співвідношення для коефіцієнта теплопередачі з рівняння (3.2.28)

$$\alpha = \frac{q_w}{T_w - T_\infty} = \frac{\lambda}{\delta} \left(1 + \frac{B}{4\lambda} \frac{(T_w^4 - T_\infty^4)}{(T_w - T_\infty)} \right) =$$

$$= \frac{\lambda}{\delta} \left(1 + \frac{4}{3} \text{Sr}_2 \right) = \frac{\lambda}{\delta_0} \left(1 + \frac{4}{3} \text{Sr}_2 \right)^{3/4}, \quad (3.2.35)$$

і далі для числа Нуссельта

$$\text{Nu} = \frac{\alpha x}{\lambda} = \text{Nu}_0 \left(1 + \frac{4}{3} \text{Sr}_2 \right)^{3/4}, \quad (3.2.36)$$

де

$$\text{Nu}_0 = \frac{\alpha_0 x}{\lambda} = \sqrt[4]{\frac{1}{4} \text{RaJa}} \quad (3.2.37)$$

Nu_0 – число Нуссельта для плівкового кипіння без радіації.

У рівнянні (3.2.37) число Релея Ra визначається за формулою

$$\text{Ra} = \frac{gx^3 \rho \Delta \rho c_p}{\lambda \mu}, \quad (3.2.38)$$

і число Якоба визначається за формулою

$$\text{Ja} = \frac{L_v}{c_p \Delta T}, \quad (3.2.39)$$

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

Аналізуючи рівняння з (3.2.32) і (3.2.36) можна зробити висновок, що, на відміну від випадку чистої конвекції, при конвективно-адіативному теплообміні зі збільшенням числа Старка одночасно зростає як товщина шару пари, так і інтенсивність теплообміну.

Умова $q_w = \text{const}$

Розглянемо умову сталості густини теплового потоку на стінці, яка описується граничними умовами (3.2.11), (3.2.12).

Продиференціюємо рівняння (3.2.17) з урахуванням граничних умов (3.2.11), (3.2.12), що дає

$$\frac{dT}{dy} = \frac{C_1}{\lambda + BT^3}. \quad (3.2.40)$$

Порівняння рівняння (3.2.11) і (3.2.40) приводить

$$C_1 = -q_w \quad (3.2.41)$$

Умова (3.2.12) дає далі

$$C_2 = \lambda T_\infty + \frac{B}{4} T_\infty^4 + q_w \delta \quad (3.1.42)$$

Тепер маємо наступне рівняння для профілю температури в паровій плівці

$$\lambda(T - T_\infty) + \frac{B}{4}(T^4 - T_\infty^4) = q_w(\delta - y). \quad (3.2.43)$$

У безрозмірному вигляді рівняння (3.2.43) виглядає так

$$(\Theta - 1) + \frac{4}{3} \text{Sr}_3 (\Theta^4 - 1) = \text{Nu}_\delta \frac{\Delta T}{T_\infty} (1 - \eta), \quad (3.2.44)$$

де

$$\Theta = \frac{T}{T_\infty}, \quad \text{Sr}_3 = \frac{\sigma T_\infty^3}{\beta \lambda}, \quad \text{Nu}_\delta = \frac{\alpha \delta}{\lambda}. \quad (3.2.45)$$

Щоб знайти товщину шару пари, можемо використати рівняння (3.2.30) за умови $q_w = \text{const}$

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{g \rho \Delta \rho \delta^3}{3 \mu} \right) = \frac{q_w}{L_v}. \quad (3.2.46)$$

Розв'язок цього рівняння за граничної умови (3.2.31) має вигляд

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{3 q_w \mu x}{g L_v \rho \Delta \rho}}. \quad (3.2.47)$$

При $y=0$, рівняння (3.2.43) наводить співвідношення для теплового потоку на стінку. Воно має такий же вигляд, як і розв'язок (3.2.28) для граничної умови $T_w = \text{const}$. Крім того, рішення для коефіцієнта тепловіддачі виглядає ідентично рівнянню. (3.2.35) для граничної умови $T_w = \text{const}$. Підстановка рівняння (3.2.47) у рівняння (3.2.35) дає співвідношення для числа Нуссельта у формі рівняння (3.2.36), де

$$\text{Nu}_0 = \frac{\alpha_0 x}{\lambda} = \sqrt[4]{\frac{1}{3} \text{RaJa}} \quad (3.2.48)$$

Таким чином, можна зробити висновок, що ефект радіаційного теплообміну під час плівкового кипіння в рамках моделі Бромлі [124] 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.

3.2.2.2. Модель Елліона (рідина в стані спокою поза паровою плівкою)

Другий набір граничних умов, запропонований Елліоном [123], описує стан спочиваючої рідини на зовнішній межі парової плівки (і поза нею). Елліон розглянув граничні умови (3.2.13), (3.2.14). Для цього випадку можна отримати рівняння (3.2.28) для теплового потоку. Елліон також отримав співвідношення для профілю швидкості, яке задовольняє граничні умови (3.2.13) і (3.2.14)

$$u = \frac{g\Delta\rho\delta^2}{2\mu} \left(\frac{y}{\delta} - \frac{y^2}{\delta^2} \right). \quad (3.2.49)$$

Підставляючи рівняння (3.2.28) і (3.2.49) в основні рівняння (3.2.7) і (3.2.8) можна легко отримати розв'язок для товщини парової плівки

$$\begin{aligned} \delta &= \sqrt[4]{\frac{12\mu\Delta T_x}{gL_v\rho\Delta\rho} \left(\lambda(T_w - T_\infty) + \frac{B}{4}(T_w^4 - T_\infty^4) \right)} = \\ &= \sqrt[4]{\frac{12\lambda(T_w - T_\infty)\mu\Delta T_x}{gL_v\rho\Delta\rho} \left(1 + \frac{B}{4\lambda} \frac{T_w^4 - T_\infty^4}{T_w - T_\infty} \right)} = \delta_0 \sqrt[4]{\left(1 + \frac{4}{3} \text{Sr}_2 \right)} \end{aligned} \quad (3.2.50)$$

де Sr_2 визначається рівнянням (3.2.33)

$$\delta_0 = \sqrt[4]{\frac{12\lambda\mu\Delta T_x}{gL_v\rho\Delta\rho}}, \quad (3.2.51)$$

δ_0 - товщина шару пари без випромінювання.

Підстановка рівняння (3.2.50) у рівняння (3.2.35) знову призводить до рівняння (3.2.36) для числа Нуссельта, де

$$\text{Nu}_0 = \sqrt[4]{\frac{1}{12} \text{RaJa}} \quad (3.2.52)$$

Nu_0 - це число Нуссельта для плівкового кипіння без радіації.

Умова $q_w = \text{const}$

Для цього випадку граничні умови задаються у вигляді рівнянь (3.2.15), (3.2.16).

Розподіл температури знову має вигляд рівняння (3.2.43). Граничні умови (3.2.15) і (3.2.16) знову призводять до профілю швидкості (3.2.49). Використовуючи цей профіль, можна прийти до співвідношення для масової швидкості потоку через плівку на одиницю довжини поверхні, яка загалом визначається рівнянням (3.2.8)

$$G_l = \frac{g\rho\Delta\rho\delta^3}{12\mu x} \quad (3.2.53)$$

Тоді, на основі рівняння (3.1.7) можна отримати співвідношення для товщини шару пари

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{12q_w\mu x}{gL_v\rho\Delta\rho}} \quad (3.2.54)$$

Використання рівнянь (3.2.35) і (3.2.54) знову дає рівняння (3.2.36) для числа Нуссельта, де число Нуссельта для плівкового кипіння без випромінювання визначається рівнянням (3.2.52). Отже, для випадку спокою рідини поза паровою плівкою число Нуссельта залишається незмінним для граничних умов $T_w = \text{const}$ та $q_w = \text{const}$.

3.2.3. Проблема нестационарності

Розглядаємо перехідний процес прогрівання пари в плівці.

Проблеми моделювання миттєвого нестационарного процесу кипіння та конденсації детально розглянуто в наших попередніх роботах [121,123]. Якщо припустити, що парова плівка на нагрітій стінці виникає миттєво

(миттєве кипіння), а температура змінюється з часом, то можна оцінити вплив радіаційного теплообміну на зміну температурного профілю та коефіцієнта тепловіддачі. Для цього скористаємося рівнянням нестационарної енергії в такій формі

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{dq_r}{dy}. \quad (3.2.55)$$

Початковою умовою є рівність температури пара в плівці при температурі насичення. Підстановка рівняння (3.2.3) у рівняння (3.2.55) дозволяє отримати

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\lambda + \frac{16\sigma T^3}{3\beta} \right) \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left((\lambda + BT^3) \frac{\partial T}{\partial y} \right) = c_p \rho \frac{\partial T}{\partial \tau}. \quad (3.2.56)$$

Щоб звести диференціальне рівняння в частинних похідних (3.2.56) до звичайного диференціального рівняння, використано аналіз симетрії (тобто аналіз групи Лі). Симетрію рівняння (3.2.56) можна отримати за допомогою нескінченно малого генератора [123]

$$\mathbf{V} = (C_1 + C_3 2\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} + (C_2 + C_3 y) \frac{\partial}{\partial y} \quad (3.2.57)$$

Третя підалгебра C_3 дозволяє отримати самоподібну змінну ζ за допомогою рівняння

$$\mathbf{V}(\zeta) = 2\tau \frac{\partial \zeta}{\partial \tau} + y \frac{\partial \zeta}{\partial y} = 0. \quad (3.2.58)$$

Рішення (3.2.58) виглядає так

$$\zeta = \frac{y}{\sqrt{\lambda \tau}} \sqrt{c_p \rho}. \quad (3.2.59)$$

Коефіцієнт $\sqrt{c_p \rho / \lambda}$ був включений сюди для отримання безрозмірної форми самоподібної змінної.

Тепер можна представити безрозмірну температуру (3.2.21) у вигляді

$$\vartheta = \frac{T(\zeta)}{T_w}. \quad (3.2.60)$$

Підстановка рівняння (3.2.60) у рівняння (3.2.56) дозволяє отримати

$$\left(1 + \frac{16}{3} Sr_1 \vartheta^3\right) \frac{d^2 \vartheta}{d\zeta^2} + \left(\frac{\zeta}{2} + 16 Sr_1 \vartheta^2 \frac{d\vartheta}{d\zeta}\right) \frac{d\vartheta}{d\zeta} = 0 \quad (3.2.61)$$

де Sr_1 визначається рівнянням (3.2.22).

Умова $T_w = \text{const}$

Щоб розв'язати рівняння (3.2.61) використовуємо наступні граничні умови

$$\vartheta = 1, \quad \text{при} \quad \zeta = 0, \quad (3.2.62)$$

$$\vartheta = \vartheta_\infty, \quad \text{при} \quad \zeta = \zeta_\delta = \frac{1}{\sqrt{Fo}}, \quad (3.2.63)$$

де

$$Fo = \frac{\lambda \tau}{c_p \rho \delta^2} \quad (3.2.64)$$

Рішення рівняння (3.2.61) з граничними умовами (3.2.62), (3.2.63) отримано чисельно за допомогою програми MATLAB. Результати чисельного моделювання наведені на рисунку 3.2.4 для різних значень числа Фур'є.

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

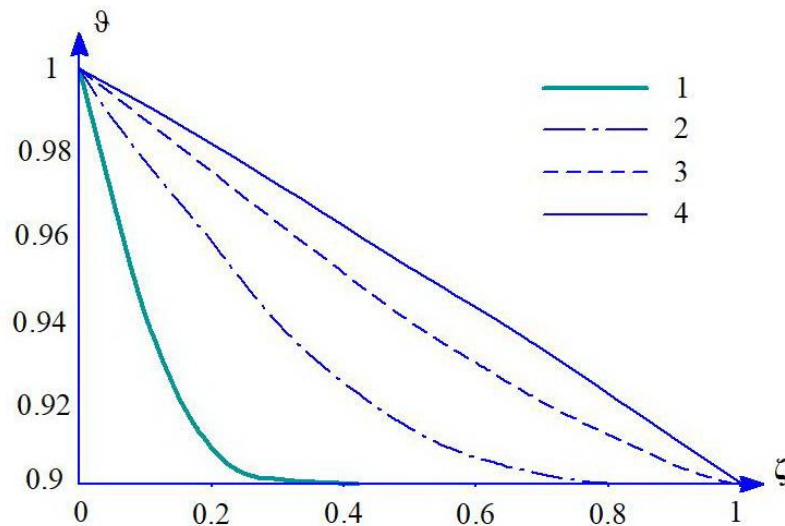


Рис.3.2.4. Зміна в часі профілю температури в паровій плівці при $\vartheta_{\infty}=0.9$, $Sr_1=1$: 1- $Fo=0.001$; 2- $Fo=0.01$; 3- $Fo=0.04$; 4- $Fo=1$.

Рисунок 3.2.5 демонструє зміну в часі нормалізованого числа Нуссельта Nu/Nu_{st} в залежності від інтенсивності радіаційного теплообміну (числа Старка). В цьому випадку Nu_{st} відповідає стаціонарним умовам і визначається рівнянням (3.2.36).

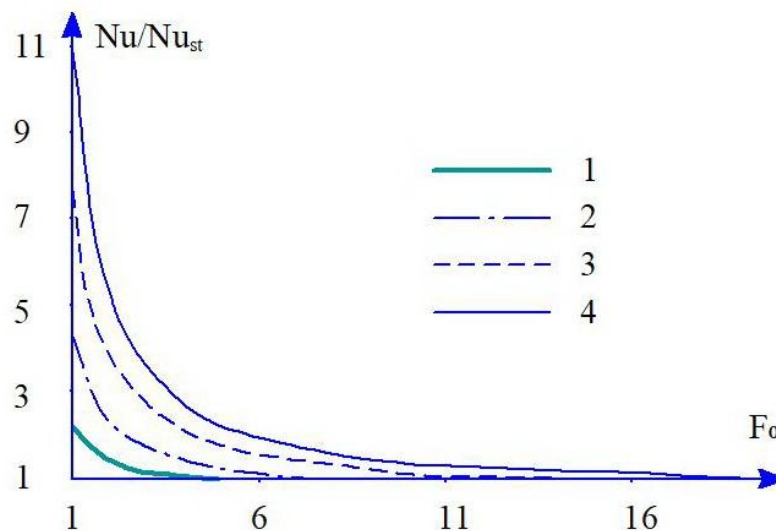


Рис.3.2.5. Зміна в часі нормалізованого числа Нуссельта Nu/Nu_{st} залежно від числа Старка при $\vartheta_{\infty}=0.9$; 1- $Sr_1=0$; 2- $Sr_1=1$; 3- $Sr_1=4$; 4- $Sr_1=8$.

Зі збільшенням часу нагрівання число Нуссельта прагне від нескінченності до сталого значення. Значний ефект радіаційного

теплообміну. Збільшення числа Старка призводить до збільшення тепловіддачі а отже, до збільшення числа Нуссельта. Рисунок 3.2.5 також показує, що збільшення радіаційного теплового потоку призводить до збільшення часу, необхідного для досягнення числом Нуссельта стаціонарного значення.

Умова $q_w = \text{const}$

Подібний результат був отриманий в умовах постійного теплового потоку на стінку. У цьому випадку розв'язок рівняння (3.2.61) буде отримано за таких граничних умов

$$\frac{d\vartheta}{d\zeta} = -\text{Nu}_\delta (1 - \vartheta_\infty) \frac{\sqrt{\text{Fo}}}{\left(1 + \frac{16}{3} \text{Sr}_1\right)}, \quad \text{при} \quad \zeta = 0, \quad (3.2.65)$$

$$\vartheta = \vartheta_\infty, \quad \text{при} \quad \zeta = \zeta_\delta = \frac{1}{\sqrt{\text{Fo}}}. \quad (3.2.66)$$

На рисунку 3.2.6 зображено зміну в часі числа Нуссельта Nu/Nu_{st} в залежності від інтенсивності радіаційного теплообміну (числа Старка). Залежна від часу зміна числа Нуссельта подібна до проаналізованої вище на рис. 3.2.5. Так, як і в стаціонарному режимі плівкового кипіння, вплив радіаційного теплообміну на число Нуссельта для двох типів граничних умов $T_w = \text{const}$ та $q_w = \text{const}$ однаковий.

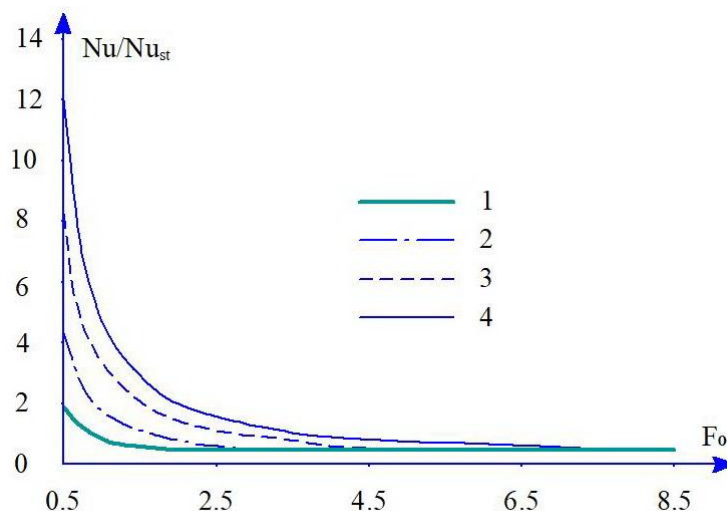


Рис.3.2.6. Зміна в часі нормалізованого числа Нуссельта Nu/Nu_{st} залежно від числа Старка при $\vartheta_\infty=0,9$; 1- $\text{Sr}_1=0$; 2- $\text{Sr}_1=1$; 3- $\text{Sr}_1=4$; 4- $\text{Sr}_1=10$.

У даній роботі отримано розв'язок задачі радіаційно-конвективного теплообміну при плівковому кипінні рідини на вертикальній нагрітій пластині. Розглянуто стаціонарну та перехідну задачі теплообміну, причому 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.

Показано вплив випромінювання та різниці температур між стінкою та рідиною на профілі температури в паровій плівці. При 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 перехідної задачі отримано залежну від часу зміну профілю температури та коефіцієнта тепловіддачі в паровій плівці. Показано вплив випромінювання (числа 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 показує, що тип граничних умов ($T_w = \text{const}$ and $q_w = \text{const}$) мало впливає на характер радіаційно-конвективного теплообміну при кипінні плівки рідини на вертикальній нагрітій стінці.

У випадку турбулентного режиму кипіння була застосована ренормалізаційна модель турбулентності для не ньютонівських рідин при нестаціонарних умовах [125,126].

Система рівнянь руху (3.2.67) та теплообміну (3.2.70) при турбулентному режимі [125] мають вигляд

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_n}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \tau} \frac{\partial}{\partial x_m} \left[B_d \left(\frac{\nu_{turb}^3 \varepsilon^*}{3A_d^{(\varepsilon^*+2)/2} D_0} \right)^{2/\varepsilon^*} \frac{\partial u_n}{\partial x_m} \right] + \frac{\partial u_n u_m}{\partial x_m} = \\ = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_n} + \frac{\partial}{\partial x_m} \left[(\nu_0 + \nu_{turb}) \frac{\partial u_n}{\partial x_m} \right] \end{aligned} \quad (3.2.67)$$

де x_m, x_n - координати; u_n - компоненти швидкості, що відповідають координатам x_n ; u_m - компоненти швидкості, що від повідають координатам x_m .

Величина D_0 прапорційна швидкості дисипації енергії ε , а параметр ε^* дорівнює чотирьом [125].

Турбулентна в'язкість визначається за формулою

$$\nu_{turb} = 0,0847 \frac{K^2}{\varepsilon} \quad (3.2.68)$$

де K - кінетична енергія турбулентності.

$$B_d = \frac{S_d}{(2\pi)^d} \frac{d^2 - d - 2}{4d(d+2)} \quad (3.2.69)$$

$$S_d = \frac{2\pi^{d/2}}{\Gamma(d/2)} \quad (3.2.70)$$

де d - розмір простору.

Рівняння теплообміну при турбулентному режимі має вигляд [125]

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \tau} \frac{\partial}{\partial x_n} \left[\left(\frac{\nu_{turb}^3 \varepsilon^*}{3A_d D_0} \right)^{2/\varepsilon^*} \frac{\partial T}{\partial x_n} \right] + \frac{\partial u_n T}{\partial x_n} = \frac{\partial}{\partial x_n} \left[(a_0 + a_{turb}) \frac{\partial T}{\partial x_n} \right] \quad (3.2.71)$$

де a_0 - молекулярна температуропровідність; a_{turb} - турбулентна температуропровідність.

Замикається нестационарними рівняннями для кінетичної енергії турбулентності та швидкості дисипації [125]

$$\frac{\partial K}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \tau} \frac{\partial}{\partial x_n} \left[\left(\frac{\nu_{turb}^3 \varepsilon^*}{3A_d D_0} \right)^{2/\varepsilon^*} \frac{\partial K}{\partial x_n} \right] + \frac{\partial u_n K}{\partial x_n} = 2\nu_{turb} S_{nm}^2 - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_n} \left(\frac{\nu_0 + \nu_{turb}}{\text{Pr}_K} \frac{\partial K}{\partial x_n} \right) \quad (3.2.72)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \tau} \frac{\partial}{\partial x_n} \left[\left(\frac{\nu_{turb}^3 \varepsilon^*}{3A_d D_0} \right)^{2/3} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_n} \right] + \frac{\partial u_n \varepsilon}{\partial x_n} = 2C_{1\varepsilon} \nu_{turb} \frac{\varepsilon}{K} S_{nm}^2 - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{K} + \frac{\partial}{\partial x_n} \left(\frac{\nu_0 + \nu_{turb}}{Pr_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_n} \right) \quad (3.2.73)$$

Турбулентна температуропровідність визначається через турбулентне число Прандтля и турбулентну в'язкість. На основі трансцендентного рівняння [125]

$$\left| \frac{Pr_{turb}^{-1} - a}{Pr^{-1} - a} \right|^{\frac{a+1}{a+b}} \left| \frac{Pr_{turb}^{-1} + b}{Pr^{-1} + b} \right|^{\frac{b-1}{a+b}} = \frac{\nu_0}{\nu_{turb}} \quad (3.2.74)$$

де

$$a = \frac{1}{2} \left(\sqrt{4 \frac{d-1}{d} \tilde{A}_d^{-1} + 1} - 1 \right), \quad b = \frac{1}{2} \left(\sqrt{4 \frac{d-1}{d} \tilde{A}_d^{-1} + 1} + 1 \right) \quad (3.2.75)$$

де Pr_K визначається за формулою [125]

$$\left| \frac{Pr_K^{-1} - a}{1 - a} \right|^{\frac{a+1}{a+b}} \left| \frac{Pr_K^{-1} + b}{1 + b} \right|^{\frac{b-1}{a+b}} = \frac{\nu_0}{\nu_{turb}} \quad (3.2.76)$$

Якщо середовище має неньютонівські властивості [126]

$$\frac{\lambda_\tau}{\rho} \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} + \frac{1}{\rho} \sigma = \nu_0 \left(\frac{\partial u_n}{\partial x_m} + \gamma_\tau \frac{\partial}{\partial \tau} \frac{\partial u_n}{\partial x_m} \right) \quad (3.2.77)$$

де τ - час; σ - напруження зсуву; λ_τ та γ_τ - час релаксації для напруження зсуву та швидкості деформації, відповідно; ν_0 - кінематична в'язкість рідини.

Тоді рівняння для турбулентної в'язкості має вигляд

$$\nu = \sqrt{\left(\frac{4}{d-1} \tilde{A}_d |\gamma_\tau - \lambda_\tau| k \right)^2 + \nu_0^2}, \quad (3.2.78)$$

Представлену методику розрахунку кипіння на вертикальній стінці впроваджено в учбовому процесі студентів технічної спеціальності НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. І.Сікорського», Додаток Б.

3.3. Моделювання осцилюючого потоку в пористому середовищі

В ємнісних акумуляторах запропоновано використовувати матеріал з фазовим переходом у вигляді гранул, однак така структура може викликати осциляції потоку рідини, що подається в «теплове ядро». Тому, було розроблено нестационарна модель осцилюючого потоку рідини у плоских та циліндричних каналах, що дозволяє оцінити вплив осциляцій на гідродинаміку потоку теплоносія (води).

3.3.1. Осцилюючий потік у пласкому каналі

Для опису осцилюючого потоку рідини представленого на рис.3.3.1, розгорнуто рівняння гідродинаміки осцилюючого потоку в пористому каналі з паралельною пластиною рівняння Дарсі, розширене Брінкманом:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \nu \frac{\phi}{K} u \quad (3.3.1)$$

де u - поздовжня швидкість, м/с; τ - час, с; x , y - поздовжня та поперечна координата, відповідно; ρ - густина рідини, м³/с; ϕ - пористість, K - це проникність пористого середовища, ν - кінематична в'язкість рідини, м²/с.

Граничними умовами є [127,128]:

$$u = -L \frac{\partial u}{\partial y} \quad \text{при} \quad y = h, \quad (3.3.2)$$

$$u = L \frac{\partial u}{\partial y} \quad \text{при} \quad y = -h \quad (3.3.3)$$

де h - півширина каналу, L - довжина проковзування.

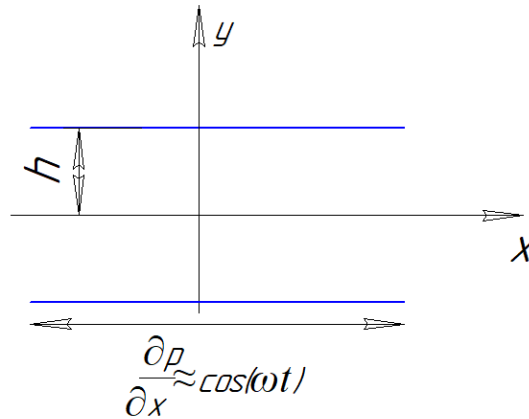


Рис. 3.3.1. Схема осцилюючого потоку рідини у пласкому каналі [129].

Для даного випадку

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = A \cos(\omega \tau) = A \Re[\exp(i\omega \tau)] \quad (3.3.4)$$

де A - амплітуда коливання. Розв'язок рівняння має вигляд

$$u = w(y) \cos(\omega \tau) = \Re[w(y) \exp(i\omega \tau)] \quad (3.3.5)$$

Підставляючи (3.3.4) і (3.3.5) в (3.3.1) отримаємо (3.3.6) у безрозмірному вигляді

$$i \text{Sh} \bar{w} = 1 + \frac{d^2 \bar{w}}{d\bar{y}^2} - \frac{\bar{w}}{\text{Da}} \quad (3.3.6)$$

де

$$\bar{w} = w \frac{\nu}{h^2 A}, \quad \bar{\tau} = \frac{\tau \nu}{h^2}, \quad \bar{y} = \frac{y}{h}, \quad \text{Da} = \frac{\kappa}{h^2 \phi}, \quad \text{Sh} = \frac{\omega h^2}{\nu} \quad (3.3.7)$$

Розв'язок рівняння (3.3.6) з граничними умовами

$$\bar{w} = -\text{Kn} \frac{\partial \bar{w}}{\partial \bar{y}} \quad \text{при } y = 1, \quad (3.3.8)$$

$$\bar{w} = \text{Kn} \frac{\partial \bar{w}}{\partial \bar{y}} \quad \text{при } y = -1 \quad (3.3.9)$$

є

$$\bar{w} = \frac{\left(\cosh\left(\sqrt{Da^{-1} + iSh}\right) - \cosh\left(\sqrt{Da^{-1} + iSh} \bar{y}\right) \right) + Kn\sqrt{Da^{-1} + iSh} \sinh\left(\sqrt{Da^{-1} + iSh}\right)}{\left(s + Da^{-1} \right) \left(\cosh\left(\sqrt{Da^{-1} + iSh}\right) + Kn\sqrt{Da^{-1} + iSh} \sinh\left(\sqrt{Da^{-1} + iSh}\right) \right)} \quad (3.3.10)$$

$$\frac{\left(\cos\left(i\sqrt{Da^{-1} + iSh}\right) - \cos\left(i\sqrt{Da^{-1} + iSh} \bar{y}\right) \right) - iKn\sqrt{Da^{-1} + iSh} \sin\left(i\sqrt{Da^{-1} + iSh}\right)}{\left(s + Da^{-1} \right) \left(\cos\left(i\sqrt{Da^{-1} + iSh}\right) - iKn\sqrt{Da^{-1} + iSh} \sin\left(i\sqrt{Da^{-1} + iSh}\right) \right)}$$

де

$$Kn = \frac{L}{h} \quad (3.3.11)$$

Представимо комплексну величину $i\sqrt{Da^{-1} + iSh}$ в наступному вигляді

$$i\sqrt{Da^{-1} + iSh} = a + ib = \quad (3.3.12)$$

$$= \left(Da^{-2} + Sh^2 \right) \left(-\sin\left(\frac{1}{2} \arctan(Da \cdot Sh)\right) + i \cos\left(\frac{1}{2} \arctan(Da \cdot Sh)\right) \right)$$

Такий вигляд дозволяє виділити в (3.3.10) реальну і комплексну частини.

Перепишемо (3.3.10) з урахуванням вище зазначеного у наступному вигляді

$$\bar{w} = \frac{di \cdot ni + dr \cdot nr + i(dr \cdot ni - di \cdot nr)}{dr^2 + di^2}, \quad (3.3.13)$$

де

$$nr(\bar{y}) = \cos(a) \cosh(b) - \cos(a\bar{y}) \cosh(b\bar{y}) + Kn(b \cos(a) \sinh(b) - a \sin(a) \cosh(b)) \quad (3.3.14)$$

$$ni(\bar{y}) = \sin(a\bar{y}) \sinh(b\bar{y}) - \sin(a) \sinh(b) - Kn(b \cosh(b) \sin(a) - a \cos(a) \sinh(b)) \quad (3.3.15)$$

$$dr = Da^{-1} \cos(a) \cosh(b) + Sh \sin(a) \sinh(b) + \quad (3.3.16)$$

$$Kn((aSh + bDa^{-1}) \cos(a) \sinh(b) - (bSh - aDa^{-1}) \sin(a) \cosh(b))$$

$$di = Sh \cos(a) \cosh(b) - Da^{-1} \sin(a) \sinh(b) + \quad (3.3.17)$$

$$Kn((bSh - aDa^{-1}) \cos(a) \sinh(b) - (aSh + bDa^{-1}) \sin(a) \cosh(b))$$

Безрозмірний профіль швидкості можна знайти за допомогою рівняння (3.3.5). Підстановка (3.3.13) у рівняння (3.3.5) дозволяє отримати

$$\bar{u}(\tau, y) = \frac{(di \cdot ni + dr \cdot nr) \cos(\bar{\omega} \tau) + (di \cdot nr - dr \cdot ni) \sin(\bar{\omega} \tau)}{dr^2 + di^2} \quad (3.3.18)$$

Знайдемо усереднену швидкість осцилюючого потоку у відносному вигляді за рівнянням

$$U(\bar{y}) = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(\tau, \bar{y})^2 d(\omega\tau)} = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{nr(\bar{y})^2 + ni(\bar{y})^2}{dr^2 + di^2}}. \quad (3.3.19)$$

Усереднений розхід потоку рідини визначається за формулою

$$G = \sqrt{\int_{-1}^1 2U(\bar{y})^2 d\bar{y}} = \quad (3.3.20)$$

$$\left[\frac{2ab - (a^2 + b^2 - 2(a-b)(a+b)Kn - (a^2 + b^2)Kn^2)\cos(2a) + 2ab(a^2 + b^2 + 2(a-b)(a+b)Kn + (a^2 + b^2)^2)Kn^2 \cosh(2b) + b(b^2 - a^2(3 + 4(a^2 + b^2)Kn))\sin(2a) + a(a^2 - 3b^2 + 4b^2(a^2 + b^2)Kn)\sinh(2b)}{2ab(a^2 + b^2)(dr^2 + di^2)} \right]^{-1}$$

3.3.2. Осцилюючий потік у циліндричному каналі

Для осцилюючого потоку в циліндричному каналі безрозмірне рівняння імпульсу має вигляд

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \nu \frac{\phi}{K} u \quad (3.3.21)$$

де r - радіальна координата, рис. 3.3.2.

Ця задача буде вирішена за таких граничних умов:

$$u = -L \frac{\partial u}{\partial r} \quad \text{при } r = R, \quad (3.3.22)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} = 0 \quad \text{при } r = 0, \quad (3.3.23)$$

де R - радіус каналу циліндричного перерізу.

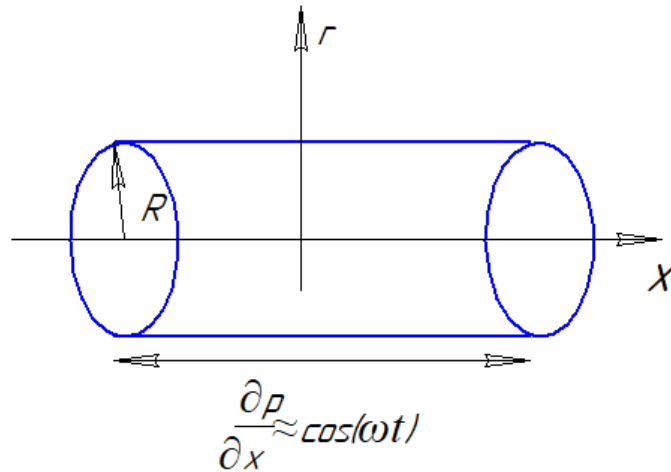


Рис. 3.3.2. Схема осцилюючого потоку рідини в циліндричному каналі [129].

Використовуючи (3.3.4) і (3.3.5) напишемо (3.3.21) у вигляді. У безрозмірному вигляді

$$iSh\bar{w} = 1 + \frac{d^2\bar{w}}{d\bar{r}^2} + \frac{1}{\bar{r}} \frac{d\bar{w}}{d\bar{r}} - \frac{\bar{w}}{Da}, \quad (3.3.24)$$

де

$$\bar{w} = w \frac{v}{R^2 A}, \quad \bar{r} = \frac{r}{R}, \quad Da = \frac{K}{R^2 \phi}. \quad (3.3.25)$$

Граничні умови в безрозмірній формі можна записати у вигляді

$$\bar{w} = -Kn \frac{\partial \bar{w}}{\partial \bar{r}} \quad \text{при} \quad \bar{r} = 1, \quad (3.3.26)$$

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial \bar{r}} = 0 \quad \text{при} \quad \bar{r} = 0. \quad (3.3.27)$$

Рішення рівняння (3.3.24) з граничними умовами (3.3.26) і (3.3.27) є

$$\bar{w}(r) = \frac{J_0(i\sqrt{Da^{-1} + iSh}) - J_0(i\bar{r}\sqrt{Da^{-1} + iSh}) - iKn\sqrt{Da^{-1} + iSh}J_1(i\sqrt{Da^{-1} + iSh})}{(Da^{-1} + iSh)(J_0(i\sqrt{Da^{-1} + iSh}) - iKn\sqrt{Da^{-1} + iSh}J_1(i\sqrt{Da^{-1} + iSh}))} \quad (3.3.28)$$

Оскільки, рівняння (3.3.28) не можна розділити у явному вигляді на реальну та уявну частини. Тому, проведено розрахунки середньої швидкості потоку рідини у безрозмірному вигляді за рівнянням

$$U(r) = \sqrt{\frac{1}{2}(\Re(\bar{w}(\bar{r}))^2 + \Im(\bar{w}(\bar{r}))^2)}. \quad (3.3.29)$$

Для великих значень комплексу Da рішення можна отримати рішення у явному вигляді. Рішення рівняння (3.3.24) з граничними умовами (3.3.26) та (3.3.27) для випадку $Da \rightarrow \infty$ має вигляд

$$\bar{w}(r) = i \frac{J_0(\bar{r}\sqrt{-iSh}) - J_0(\sqrt{-iSh}) + (i-1)Kn\sqrt{Sh/2}J_1(\sqrt{-iSh})}{Sh(J_0(\sqrt{-iSh}) + (i-1)Kn\sqrt{Sh/2}J_1(\sqrt{-iSh}))} \quad (3.3.30)$$

У даному випадку функції Бесселя можна розділити на дійсну та уявну частини через функції Кельвіна першого роду за формулою

$$J_n(\sqrt{-iSh}) = \text{ber}_n(\sqrt{Sh}) + i\text{bei}_n(\sqrt{Sh}). \quad (3.3.31)$$

Підставивши (3.3.31) в (3.3.30), а потім отриманий результат в (3.3.5). Отримаємо

$$\bar{u} = \frac{ns \sin(\bar{\omega} \tau) + cs \cos(\bar{\omega} \tau)}{dnc} \quad (3.3.32)$$

де

$$\begin{aligned} \bar{n}\bar{s} = & \text{ber}_0(\sqrt{Sh})^2 + \text{bei}_0(\sqrt{Sh})^2 - \text{ber}_0(\sqrt{Sh})\text{ber}_0(\bar{r}\sqrt{Sh}) - \text{bei}_0(\sqrt{Sh})\text{bei}_0(\bar{r}\sqrt{Sh}) + \\ & Kn\sqrt{Sh/2}(\text{ber}_1(\sqrt{Sh})[\text{ber}_0(\bar{r}\sqrt{Sh}) - \text{bei}_0(\bar{r}\sqrt{Sh})] + \text{bei}_1(\sqrt{Sh})[\text{ber}_0(\bar{r}\sqrt{Sh}) + \text{bei}_0(\bar{r}\sqrt{Sh})]) - \\ & Kn^2Sh(\text{ber}_1(\sqrt{Sh})^2 + \text{bei}_1(\sqrt{Sh})^2) \end{aligned} \quad (3.3.33)$$

$$\begin{aligned} \bar{n}\bar{c} = & \text{bei}_0(\sqrt{Sh})\text{ber}_0(\bar{r}\sqrt{Sh}) - \text{ber}_0(\sqrt{Sh})\text{bei}_0(\bar{r}\sqrt{Sh}) + \\ & Kn\sqrt{Sh/2}[\text{ber}_1(\sqrt{Sh})(\text{ber}_0(\bar{r}\sqrt{Sh}) + \text{bei}_0(\bar{r}\sqrt{Sh}) - 2\text{ber}_0(\sqrt{Sh})) + \\ & + \text{bei}_1(\sqrt{Sh})(\text{bei}_0(\bar{r}\sqrt{Sh}) - \text{ber}_0(\bar{r}\sqrt{Sh}) + 2\text{ber}_0(\sqrt{Sh})) - 2\text{bei}_0(\sqrt{Sh})(\text{ber}_1(\sqrt{Sh}) + \text{bei}_1(\sqrt{Sh}))] \end{aligned} \quad (3.3.34)$$

$$\begin{aligned} \bar{d}\bar{n}\bar{c} = & \text{Sh} \left\{ \text{ber}_0(\sqrt{\text{Sh}})^2 + \text{bei}_0(\sqrt{\text{Sh}})^2 - \text{ber}_0(\sqrt{\text{Sh}})\text{ber}_0(\bar{r}\sqrt{\text{Sh}}) - \text{bei}_0(\sqrt{\text{Sh}})\text{bei}_0(\bar{r}\sqrt{\text{Sh}}) + \right. \\ & \text{Kn}\sqrt{2\text{Sh}} \left(\text{ber}_0(\sqrt{\text{Sh}}) [\text{ber}_1(\sqrt{\text{Sh}}) + \text{bei}_1(\sqrt{\text{Sh}})] + \text{bei}_0(\sqrt{\text{Sh}}) [\text{bei}_1(\sqrt{\text{Sh}}) - \text{ber}_1(\sqrt{\text{Sh}})] \right) + \\ & \left. \text{Kn}^2\text{Sh} \left(\text{ber}_1(\sqrt{\text{Sh}})^2 + \text{bei}_1(\sqrt{\text{Sh}})^2 \right) \right\} \end{aligned} \quad (3.3.35)$$

Гратковий метод Больцмана (LBM) базується на дискретизації рівняння Больцмана в наближенні Бхатнагара-Гросса-Крука [130].

У межах наближення BGK рівняння Больцмана можна переформатувати у кінцево-різницевої формі [131,132] дана методика представлена у розділі 2.2.

Час релаксації ζ при моделюванні мікропотоків визначається за допомогою числа Кнудсена, а не в'язкості [131]

$$\zeta = \text{Kn} N_y + \frac{1}{2} \quad (3.3.36)$$

де N_y - кількість елементів у стовпі решітки поперек каналу.

Швидкість ковзання по стінці розраховується як

$$u_w = u' \frac{\text{Kn} N_y}{(1 + \text{Kn} N_y)} \quad (3.3.37)$$

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

Було задано наступні макроскопічні граничні умови:

- на вході – осцилюючий потенціал за методом [133];
- нульовий градієнт швидкості на виході;
- бокові стінки з компонентами швидкості ковзання u_w .

Осцилюючі зміни потенціалу формувались програмним шляхом на вхідній межі згідно (3.3.4). Розрахунки проводилися в середовищі GNU Octav, сумісному з середовищем MATLAB. Мікрограничні умови були задані за допомогою процедури, описаної в [131].

Для вибору оптимального розміру решітки D2Q9 були проведені тестові обчислення на сітках із 100×20 , 200×40 та 200×60 комірок уздовж осей x та y , відповідно. Розрахунки показали, що максимальна різниця в полях швидкостей для сіток 200×40 і 200×60 не перевищує 0,1%. Тому для подальшого моделювання була використана сітка розміром 200×40 комірок.

Також, для сітки D3Q27 була обрана сітка $200 \times 40 \times 40$, оскільки різниця між сітками становить 1%.

Аналіз рівнянь (3.3.10) та (3.3.28) вказує, що 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. 3.3.3. та рис. 3.3.4. за умови сталості значень параметрів Da та Kn . Суцільні лінії позначають аналітичні профілі, побудовані відповідно до рівнянь (3.3.19) і (3.3.29); пунктирними лініями позначені чисельні результати LBM. На рисунках U_0 значення U в центрі каналу. З рис. 3.3.3. та рис. 3.3.4. 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. Це явище зветься анулярним ефектом Річардсона [135].

Рис. 3.3.3. та рис. 3.3.4. ілюструє, що результати аналітичного та чисельного моделювання досить добре узгоджуються.

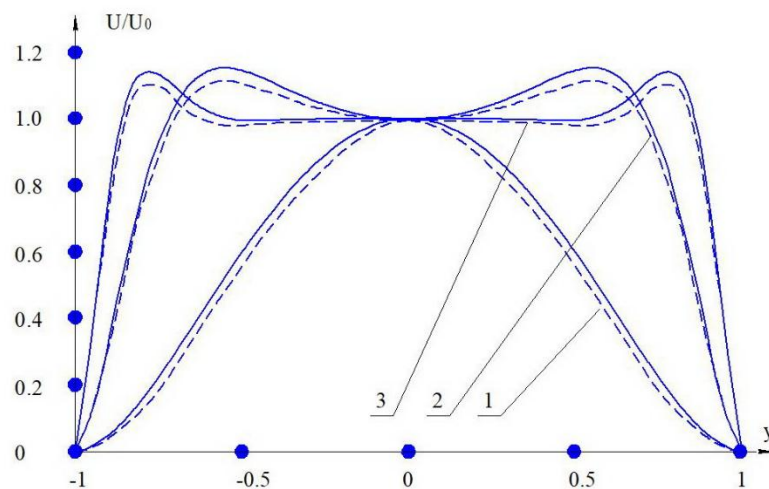


Рис. 3.3.3. Профілі відносного потоку U/U_0 в плоскому каналі для різних значень параметра Sh . Суцільні лінії - 1 і 2, пунктир - LBM.

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

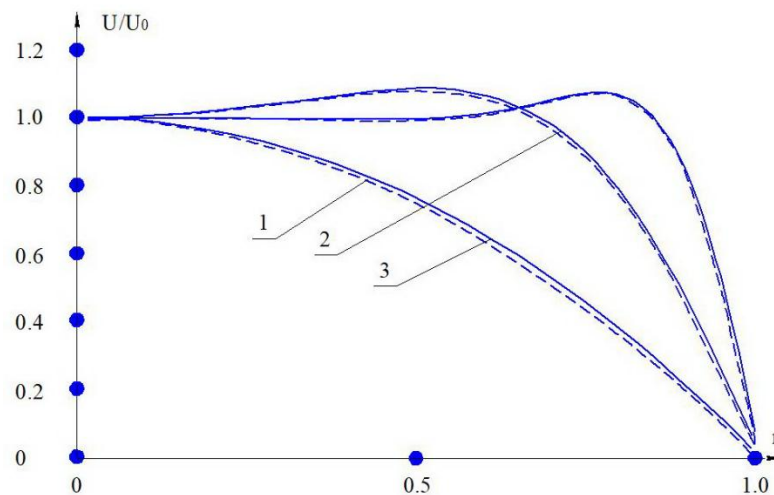


Рис. 3.3.4. Профілі відносного потоку U/U_0 в циліндрочному каналі для різних значень параметра Sh . Суцільні лінії – 2 і 3, пунктир - LBM.
1 – $Sh = 5$; 2 – $Sh = 50$; 3 – $Sh = 200$.

Вплив параметру Da на поведінку профілів швидкості в осцилюючому потоці показано на рис. 3.3.5. та рис. 3.3.6. Як видно, з рисунків чисельне значення параметру Da несуттєво впливає на положення максимуму швидкості. Однак, зростання значення цього параметра збільшує значення максимуму. Цей рух є викладеним згідно з фактом, що параметр Da , відповідно до (3.3.7), є доцільним до τ [136]. Якщо параметр Da збільшується, зменшується вплив зіткнень на профілі швидкості. Це, в свою чергу, зменшує опір. І тому, значення максимуму профілю швидкості зростає. Також можна відзначити досить високе узгодження результатів аналітичного та чисельного моделювання.

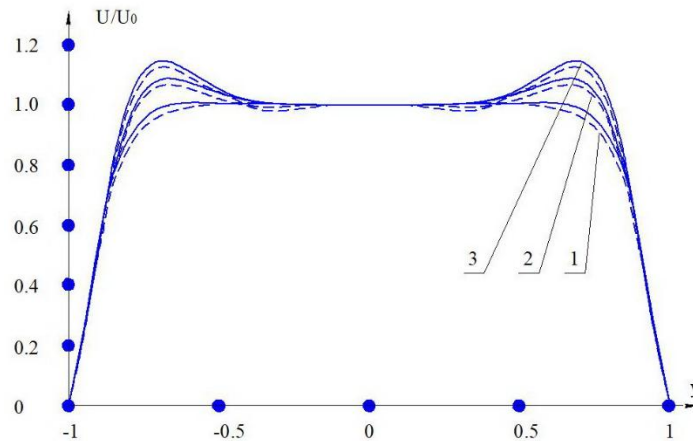


Рис. 3.3.5. Профілі відносного потоку U/U_0 в плоскому каналі для різних значень параметру Da . Суцільні лінії - 2 і 1, штрихові - LBM.
1 – $Da = 0.01$; 2 – $Da = 0.05$; 3 – $Da = 1000$.

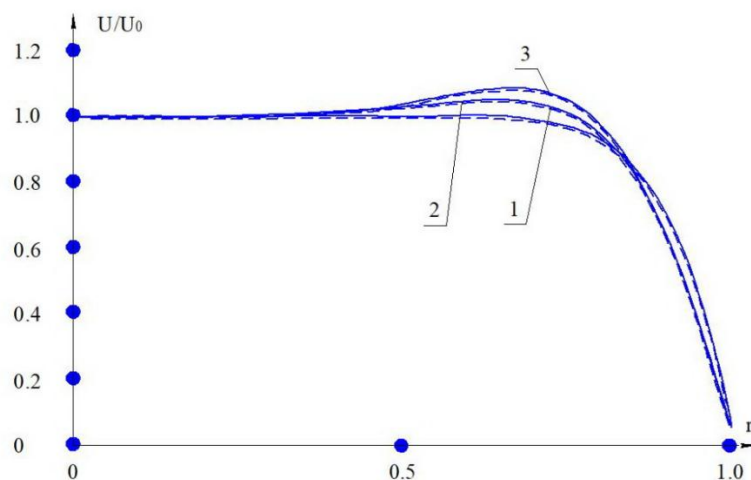


Рис. 3.3.6. Профілі відносного потоку U/U_0 в циліндричному каналі для різних значень параметру Da . Суцільні лінії - 2 і 3, штрихові лінії - LBM.
1 – $Da = 0.01$; 2 – $Da = 0.05$; 3 – $Da = 1000$.

На рис. 3.3.7. та рис. 3.3.8. зображено вплив значень параметрів Sh та Da на значення безрозмірної витрати (продуктивності). На рис. 3.3.7. та рис. 3.3.8. представлено лише данні LBM, оскільки ці данні практично співпадають з аналітичними.

На рис. 3.3.7. та рис. 3.3.8. показано, що збільшення частоти осциляцій призводить до зменшення витрати потоку а, відповідно і продуктивності обладнання. Це пояснюється зростанням інерційності осцилюючого потоку із

зростанням частоти [137]. Зменшення витрати, тобто 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 [138]. Отже, зі зростанням частоти зростає хаотичність руху носіїв та кількість їх зіткнень. Таким чином, зростання частоти призводить до зростання опору потоку теплоносія.

На рис. 3.3.7. показано, що зростання параметра Da (зменшення впливу зіткнень носіїв) призводить до збільшення продуктивності (витрат). Зі зростанням частоти вплив параметра Da зменшується через утворення вихорів.

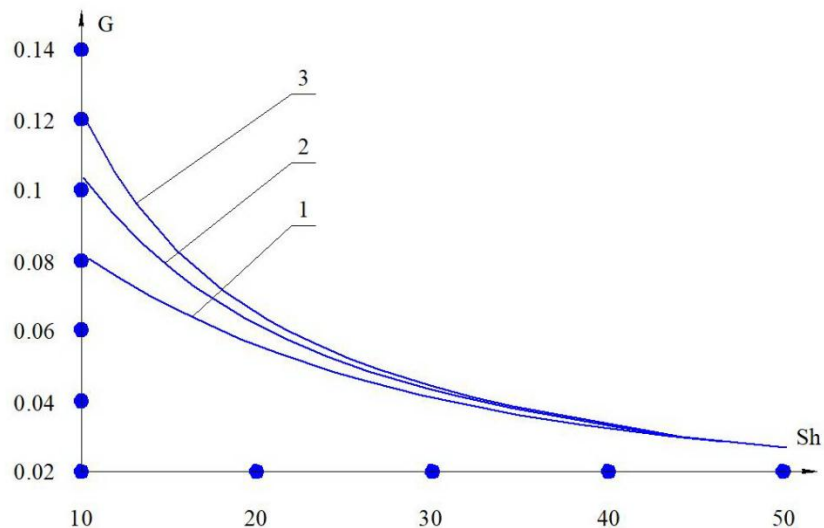


Рис. 3.3.7. Залежність безрозмірної витрати потоку рідини G у пласкому каналі для різних значень параметра Da : 1 - $Da = 0.1$; 2 - $Da = 0.2$; 3 - $Da = 1$.

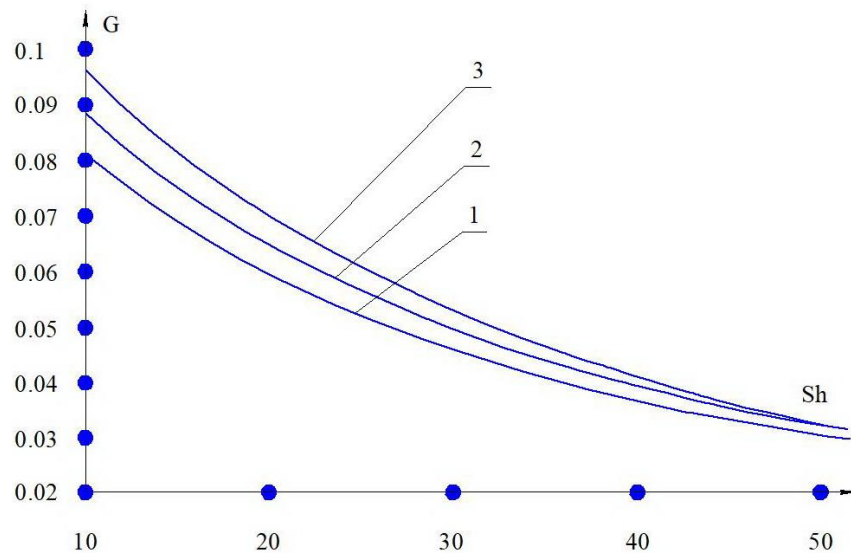


Рис. 3.3.8. Залежність безрозмірної витрати потоку рідини G у циліндричному каналі для різних значень параметра Da :
1 - $Da = 0.1$; 2 - $Da = 0.2$; 3 - $Da = 1$.

Розроблено нестационарну модель осцилюючого потоку рідини у плоских та циліндричних каналах. Аналітичні дані порівнювалися з чисельними результатами, одержаними за допомогою LBM.

Показано, що поведінка осцилюючого потоку рідини при впливі осцилюючого градієнта потенціалу визначається двома безрозмірними параметрами Sh та Da .

Зі збільшенням значення частоти Sh у плоскому та круглому 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 Da (зменшення впливу зіткнень носіїв) призводить до збільшення щільності потоку. Зі зростанням частоти вплив параметра Da зменшується через утворення вихорів.

Отримані результати аналітичного та чисельного моделювання досить добре узгоджуються. Дану методику розрахунку впроваджено в учбовому

процесі студентів технічної спеціальності НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. І.Сікорського», Додаток В.

Висновки за розділом 3

1. В результаті математичного аналізу було виведено рівняння що описує процес нагрівання матеріалу з фазовим переходом всередині «теплового ядра» враховуючи радіальне перенесення теплоти.

Досліджено розрахункові-залежності теплоємності матеріалу з фазовим переходом від температури враховуючи змінення теплоємності по косинусоїдальному закону, що в результаті порівняння експериментальних і отриманих розрахункових даних продемонстрували високу степні узгодження.

2. У результаті аналітичних і експериментальних досліджень було підтверджено вірність вибору РСМ для «теплового ядра», а саме в дослідному зразку МТА-0,5МВт використано цезезин. Визначено температурні режими, що забезпечують фазовий перехід «плавлення/затвердіння».

3. У даній роботі отримано розв'язок задачі радіаційно-конвективного теплообміну при плівковому кипінні рідини на вертикальній нагрітій пластині. Розглянуто стаціонарну та нестаціонарну задачі теплообміну, остання описує миттєве (вибухове) кипіння рідини на нагрітій поверхні.

4. Отримано аналітичний розв'язок задач стаціонарного режиму для граничних умов, що містять постійну температуру стінки та постійний тепловий потік стінки.

Показано вплив випромінювання та різниці температур між стінкою та рідиною на профілі температури в паровій плівці. При 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.

5. В результаті вирішення нестационарної задачі отримано залежну від часу зміну профілю температури та коефіцієнта тепловіддачі в паровій плівці. Показано вплив випромінювання (числа Старка) на коефіцієнт тепловіддачі. Збільшення радіаційного теплового потоку призводить до збільшення числа Нуссельта і часу, за який процес теплопередачі виходить на стаціонарний режим.

6. Аналіз результатів показує, що тип граничних умов ($T_w = \text{const}$ and $q_w = \text{const}$) мало впливає на характер радіаційно-конвективного теплообміну при кипінні плівки рідини на вертикальній нагрітій стінці.

7. Розроблено нестационарну модель осцилюючого потоку рідини у плоских та циліндричних каналах з пористим середовищем. Аналітичні дані порівнювалися з чисельними результатами одержаними за допомогою методу ґраток Больцмана. Отримані результати мають високу степінь узгоджуваності.

8. Показано, що поведінка осцилюючого потоку рідини при впливі осцилюючого градієнта тиску визначається двома безрозмірними параметрами Sh (числа Струхаля) та Da (числа Дарсі). Зі збільшенням значення частоти (Sh) у плоскому та круглому каналах максимум опосередкованого за період коливань потоку частинок зміщується від центру до периферії.

9. Зі зростанням кількості осциляцій зростає хаотичність руху носіїв та кількість їх зіткнень, що також призводить до зростання опору, що негативно впливає на процес теплообміну.

10. Збільшення параметра Da (зменшення впливу зіткнень носіїв) призводить до збільшення щільності потоку. Зі зростанням частоти вплив параметра Da зменшується через утворення вихорів.

РОЗДІЛ 4.

СТВОРЕННЯ ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧОЇ РІДИНИ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЇЇ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

4.1. Вибір основних складових теплоакumuлюючої рідини на основі експериментальних досліджень співвідношення енергетичних витрат до часу акумуляції

Основна складова мобільного теплового акумулятору його робоче тіло – це теплоакumuлюючий матеріал. У якості теплоакumuлюючого матеріалу застосовують – теплоакumuлюючі рідини, матеріали з фазовим переходом, тверді тіла (камінь, пісок, брикети з вуглецем, тощо) [140-141]. Теплофізичні властивості теплоакumuлюючого матеріалу визначають температурний діапазон роботи обладнання та регламентують теплову потужність теплового акумулятора і економічно доцільну дистанцію транспортування [34-36].

Оскільки України прагне приєднатися до Європейського Союзу доцільно при створенні нового акумуляційного обладнання та теплоакumuлюючих матеріалів, при прийнятті рішень керуватись принципами і вимогами європейських країн, які переходять до 4 і 5 покоління тепlopостачань [5,6,20]. Одним з основних параметрів є застосування низькопотенційних джерел енергії і зниження температури теплоносія до 30÷50 °С. У якості джерел енергії країни Євросоюзу використовують, переважно об'єкти «зеленої енергетики» - сонця, вітру, геотермальної енергетики [5,6,42,43]. У повoєнний час на території України будуть відновлені генераційні потужності «зеленої енергетики» сонця і вітру, які в перспективі можуть бути основними джерелами для заряджання МТА.

Перевезення теплової енергії регулюються міжнародними та національними стандартами кожної з країн користувачів M-TES, тому окремим обмежуючим фактором є законодавча база. В Україні відсутня законодавча база транспортування теплової енергії за допомогою M-TES,

однак є положення «Про приєднання України до Європейської угоди про Міжнародне дорожнє перевезення небезпечних вантажів (ДОПНВ)» від 2 березня 2000 р. № 1511-III [45-47].

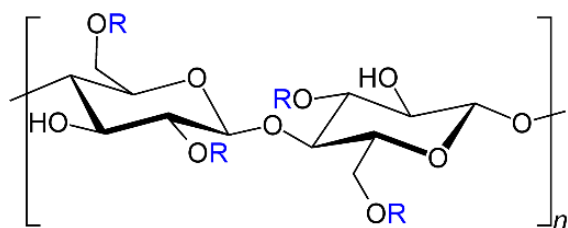
З огляду на відсутність законодавчої бази і обмеженням по перевезенню небезпечних речовин необхідно було створити вибухо- і пожежобезпечну теплоакумуючу рідину. Тому, обирали речовини і матеріали з фазовим переходом, що застосовуються у харчовій промисловості і не утворюють агресивних середовищ. Такі речовини, як правило, не схильні до окислення чи самозаймання, не токсичні та корозійно стійкі, а також не становлять вибухо- і пожежної небезпеки. Ці фактори забезпечують екологічну безпеку при експлуатації створеної теплоакумуючої рідини. Окрім, цього вони є доступними на ринку України та економічно доцільними.

Окрім води і водорозчинних полімерів рослинного походження, для уникнення замерзання теплоакумуючої рідини при не регламентованому застосуванні обладнання, було використано антифриз Defreeze на основі природньої речовини бішофіту [52].

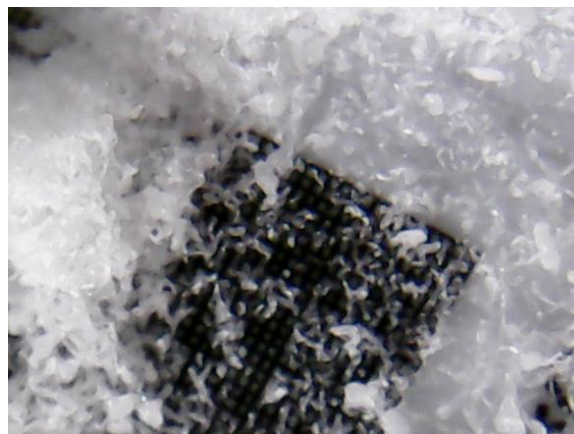
4.1.1. Хімічні та фізичні властивості багатофункціональних порошків та антифризу

Розглянемо хімічні та фізичні властивості багатофункціональних порошків на прикладі полісахаридів, що широко використовуються у різноманітних галузях промисловості [142-145].

Карбоксиметилцелюлоза (Carboxymethylcellulose, КМЦ, целюлозогліколева кислота) – водорозчинний полімер, продукт переробки целюлози загального складу $[C_6H_7O_2(OH)_3-x(OCH_2COOH)_x]_n$ (де $x = 0,08-1,5$). У молекулі карбоксилметильна група $(-CH_2-COOH)$ поєднується гідроксильними групами глюкозних мономерів, рисунок 1.



а)



б)

Рис. 4.1.1. Карбоксиметилцелюлоза [144-146]:

а) молекулярна будова КМЦ; б) фото КМЦ (збільшення x75).

Карбоксиметилцелюлоза, натрійкарбоксиметилцелюлоза (харчова добавка E466) - безбарвна аморфна речовина, слабка кислота, за своєю хімічною природою є високополімерний іонний електроліт. Карбоксиметилцелюлозу отримують як результат реакції монохлороцтової кислоти з алкілцелюлозою, яку, у свою чергу, отримують з целюлози та каустичної соди. Карбоксиметилцелюлоза може бути генетично модифікована. Вона розчиняється у воді, не має запаху і безпечна у використанні. Карбоксиметилцелюлоза не розкладається під дією сонячного світла, не розчиняється в рослинних і тваринних маслах [144-146]. КМЦ розчиняється в органічних кислотах: мурашиній, молочній, крижаній оцтовій. У розчинах мінеральних кислот відбувається гідролітична деструкція метилцелюлози (МЦ) з глікозидних зв'язків із збереженням метоксильних груп. Насправді для отримання істинних розчинів МЦ спочатку замочують у гарячій воді (80-85 °C) для рівномірності змочування всіх частинок і згодом додають холодну воду. У разі підвищення температури в'язкість розчинів МЦ зменшується. Але при досягненні деякої температури відбувається розшарування фаз або утворення гелю [145,146].

Камедь ксантана або ксантанова камедь (C₃₅H₄₉O₂₉)_n - природне хімічне з'єднання, харчова домішка E415. Відноситься до групи стабілізаторів у харчовій промисловості. Ксантанова камедь - вуглеводневий

полімер з високою молекулярною масою, лінійний поліцукрид, рис. 4.1.2. Молекулярну масу й властивості ксантану можна регулювати, змінюючи умови життєдіяльності мікроорганізмів *Xanthomonas campestris*.

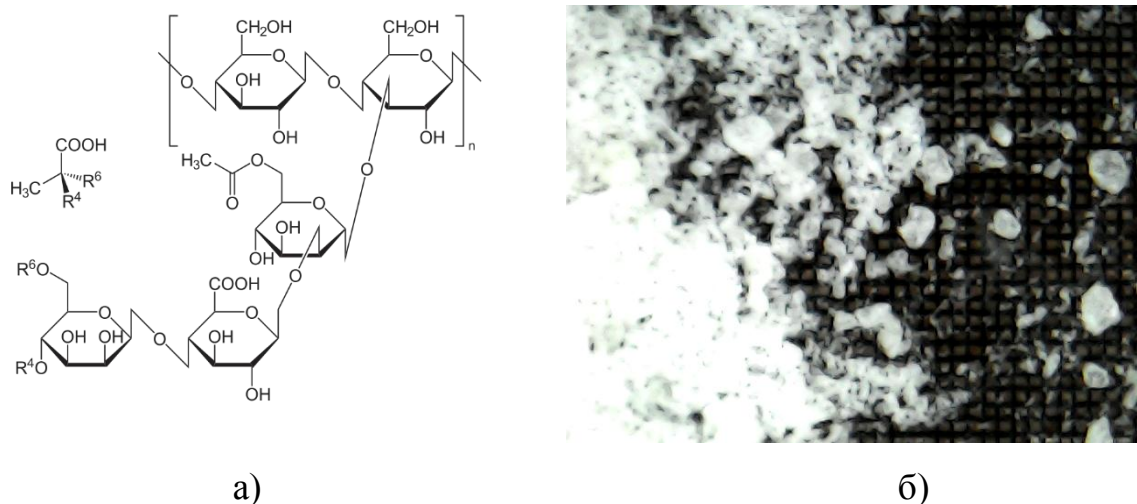


Рис. 4.1.2. Камедь ксантана [143, 147-149]:
а) молекулярна будова; б) фото (збільшення x75).

Розчин ксантану відзначається стійкістю до дії кислот (окрім соляної) та лугів, високих (до 120°C) та низьких (до -18°C) температур, спиртів та ферментів. Для ВРП на основі ксантанової камеді характерні високі значення в'язкості в діапазоні рН в межах від 2 до 12. Тому ВРП на основі камеді ксантану формує щільну структуру, довгостроково стабілізує харчові продукти та подовжує термін їх. Завдяки цим властивостям використовується у виробництві соусів, молочних продуктів, морозива, десертів, хлібобулочних виробів, напоїв та іншого [143].

Камедь гуарова ((C₆H₁₀O₅)_n) – порошок білого або жовтуватого кольору з характерним запахом. Його отримують із меленого ендосперму насіння гуарових бобів. Насіння містить до 70 % камеді (вищого полісахариду – галактоманнану). Молекулярная маса гуарової камеді >20000 [150-152].

Камедь гуарову використовують як стабілізатор, загусник або як засіб для капсулювання. Основною перевагою природних рослинних полісахаридів є низька вартість, проте їх технологічні показники невисокі,

що звужує сферу застосування. Тому використовують хімічно модифіковані похідні целюлози, крохмалю і гуару, що мають комплекс необхідних технологічних властивостей.

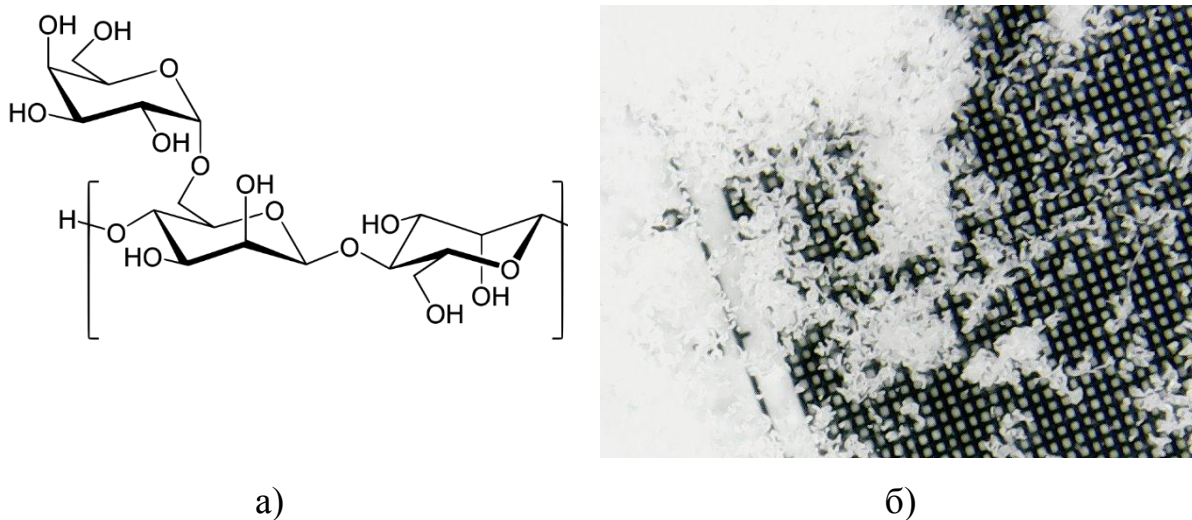


Рис. 4.1.3. Камедь гуарова [143,150-152]:
а) молекулярна будова; б) фото (збільшення x100).

Розроблений на початку 1970-х років гідроксипропілгуар (HPG) стає найбільш широко використовуваним загусником технологічних рідин. HPG отримують реакцією пропіленоксиду з молекулою гуара, що дозволяє отримати більш в'язкий і стійкий до дії високих температур полімер. Продукти гуара зазвичай мають негідратуючий залишок у межах 8-12 %, HPG – 1-4 % [150-152].



Рис.4.1.4. фото Defreeze (x100).

До складу теплоакумуючої рідини входить антифриз Defreeze на основі природної речовини бішофіту [52], рис. 4.1.4. Дефриз - це водно-мінеральний розчин, що отримується з природного магнію хлориду гексагідрату ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) і містить органічні стабілізатори, наноінгібітори для захисту від корозії, дистильовану або деіонізовану воду. Defreeze не токсична рідина світло-жовтого кольору,

не містить синтетичних чи отруйних речовин, в тому числі спиртів, нітритів, амінів, етиленів, що забруднюють оточуюче середовище, таблиця 4.1.

Таблиця 4.1 Технічні характеристики антифризу Defreeze -30°C [59].

п.п.	Параметр	Значення
1	Зовнішній вигляд	світло-жовтий
2	Температура кипіння	+116°C
3	Температура кристалізації	-21°C
4	Температура замерзання	-30°C
5	Густина при 20°C	1170 кг/м ³
6	Водневий показник, рН при 20°C	7,6
7	Лужність	min.10, см ³
8	Набухання гуми	< 0,8%
9	Піноутворення	немає
10	Об'ємне розширення при 100°C	0,326*10 ⁻³ , 1/K
11	Клас небезпечності	4, не горить
12	Робочі температури	110°C до -20°C
13	Захист від замерзання	0°C до -30°C

Антифриз Defreeze виробляється згідно [153] Не підлягає обов'язковій сертифікації та відповідає технічним вимогам до низько замерзаючих рідин [154].

4.1.2. Експериментальні стенди. Методики досліджень та приведення вимірювань

Дослідження акумулюючої здатності теплоакumuлюючої рідини і матеріалів з фазовим переходом в об'ємі ємності.

Експериментальний стенд. Дослідження процесу термоцикування теплоакumuлюючої рідини методом T-history проводили на експериментальному стенді, схему якого представлено на рис.4.1.5, [112,155]. Зазначений метод дозволяє оцінити акумулюючу здатність шуканої рідини і повторюваність акумуляції, шляхом нагріву і охолодження

зразка. Метод T-history дозволяє досліджувати мікро- та макрооб'єкти до $100 \div 125$ мл, різної консистенції – твердої чи рідкої.

Основними елементами є ємність 1 в якій міститься досліджуваний зразок теплоакумуючої рідини 2 та ємність 3 в якій розташовано досліджуваний матеріал з фазовим переходом 4. Таким чином, нагрів і охолодження зразків здійснюється одночасно і максимально наближено до процесу теплообміну в реальному ємнісному тепловому акумуляторі. Нагрів здійснюється за допомогою нагрівального у5. В кожну ємність встановлено термоелектричний перетворювач температури хромель-алюмель 6, що з'єднаний з автоматичним цифровим перетворювачем «TRITON 6004TC» 7, який вимірює і реєструє покази зміни температури і виводить їх на екран ПК 8. Витрата електроенергії на нагрів здійснюється лічильником 9.

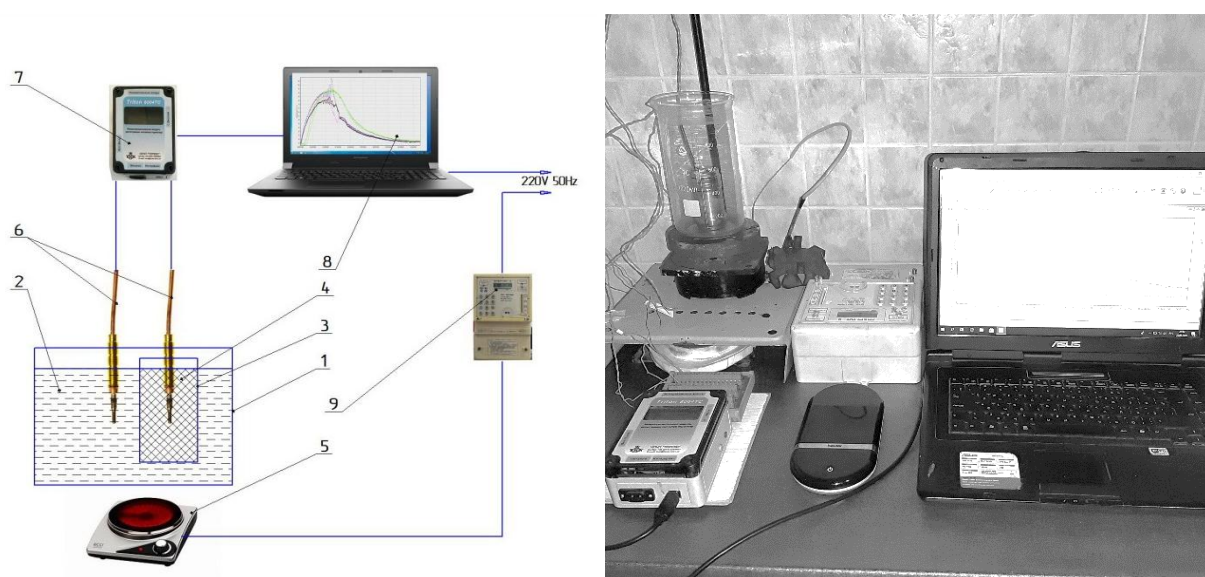


Рис. 4.1.5. Лабораторний експериментальний стенд [112, 155]:

- 1,3 – ємність; 2 – зразок теплоакумуляційної рідини; 4 – РСМ;
 5 – нагрівальний елемент; 6 – термоелектричний перетворювач температури;
 7 – вимірювально-реєструючий прилад «TRITON 6004TC»;
 8 – ПК; 9 – лічильник електроенергії.

Ємність у спрощеному вигляді імітує процес, що відбувається у теплоакумуючій ємності мобільного теплового акумулятору [156]. Який можна представити як дві ємності встановлені одна в одну, рис. 4.1.6. При

проведенні досліджень в ємності 1 розташовують досліджуваний зразок з змінними компонентами.

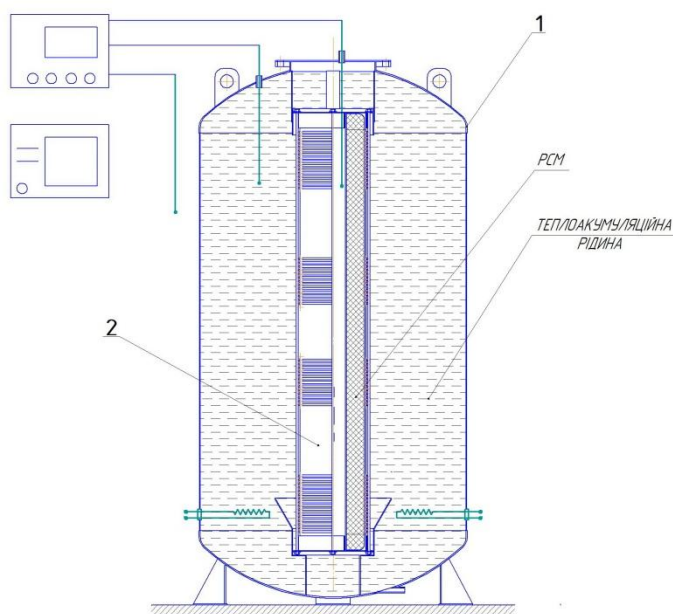


Рис. 4.1.6. Експериментальний стенд «Тепловий акумулятор ємнісного типу»: 1 – ємність з теплоакумуючою рідиною; 2 – ємність заповнена матеріалом з фазовим переходом [156].

Температура у всіх експериментальних стендах вимірюється термоелектричними перетворювачами температури 6, за допомогою мікропроцесорного модулю «TRITON 6004TC» 7 (Україна, Науково-виробниче приватне підприємство "ТЕРЕКС"). Мікропроцесорний модуль призначений для реєстрації температури з функцією автоматичної компенсації температури холодного спаю. В режимі реального часу виміри у вигляді таблиць або графіків виводяться на екран комп'ютеру. Основні характеристики мікропроцесорного модулю знаходяться у таблиці 4.2.

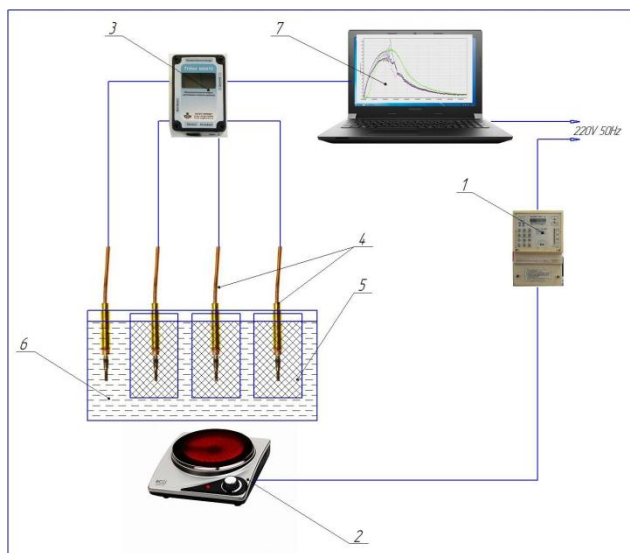
Візуалізація експериментальних досліджень здійснюється за допомогою програмного забезпечення Data Recoder встановленого на ПК [156].

У випадку одночасного дослідження декількох зразків теплоакумуючої рідини, рис.4.1.7 до схеми вимірювання температури

додається необхідна кількість термоелектричних перетворювачів 4 кожен з яких встановлюється по центру лунки 5. Кількість лунок відповідає кількості досліджуваних зразків.

Таблиця 4.2. Технічні характеристики мікропроцесорного модуля «TRITON 6004TC».

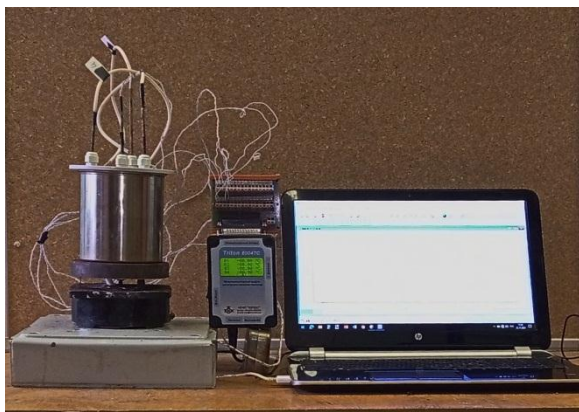
Показники	Значення
Кількість термоелектричних перетворювачі, що можуть підключаються	16 (8 дифф.)
Типи застосовуваних термопар	МК, ХА, ХК, ПП, ПР и др.
Діапазон вхідної напруги	$\pm 19,5$ мВ, $\pm 39,0$ мВ, $\pm 1,17$ В
Тривалість циклу вимірів	4 с
Смуга пропускання вхідних ланцюгів	0...25 Гц
Тип датчика компенсації холодного спаю	РТ100, РТ1000
Інтерфейс обміну даними	USB
Швидкість обміну за інтерфейсом	до 115200 біт/с
Довжина лінії зв'язку	до 5м
Напруга живлення	от USB, от 220В 50Гц
Габаритні розміри	94x160x50 мм



а)



в)



б)

Рис. 4.1.7. Принципова схема (а) і фото (б) стенду, із застосуванням методу T-history, розташування лунок 5 (в): 1 – лічильник електричної енергії (з функцією контролю сили струму та напруги), 2 – джерело теплоти, 3 – АЦП «TRITON 6004TC», 4 – датчик температури, 5 – лунки, 6 – ємність, 7 – ПК.

Методика проведення досліджень.

1. Досліджувані речовини у визначених поєднаннях (таблиця 4.2) розташовуються у ємностях 1 і 2. В ємності 1 досліджуються зразки теплоакумуючого матеріалу об'ємом 1 л. В ємності 2 розташовано РСМ матеріал об'ємом до 100мл. Ємність 2 демонструє роботу «теплового ядра». Робочі об'єми досліджуваних речовин підібрано у відповідності 10:1. Ємності герметично закриваються кришками з попередньо встановленими термопарами: t_1 – температура оточуючого середовища; t_2 – температура водної системи в ємності 1; t_3 – температура речовини у ємності 2 [156]..

2. За допомогою програму DataRecorder, спостерігаємо візуалізацію початку вимірювань температури;

3. Лічильник 9, фіксує показники електроенергії;

4. Фіксуємо роботу мікропроцесорного модуля 7 і лічильника тепла 9.

5. Нагрівання досліджуваних речовин проводимо в діапазоні температур аналогічному температурному навантаженні M-TES. При температурі $t_2=85^{\circ}\text{C}$, відключаємо подачу тепла. Продовжуємо вимірювати температуру і електроспоживання. При температурі $t_2=30^{\circ}\text{C}$, експеримент завершено. Відключаємо вимірювальне обладнання.

6. В процесі дослідження вимірюється:

- зміни температури в теплоакумуючій рідині в ємності 1, РСМ в ємності 2 і температуру оточуючого повітря.

- час нагріву і охолодження, що дозволить визначити час зарядки і розрядки теплового акумулятору;
- енергоспоживання, що витрачається на нагрів до заданих температур теплоакумулюючого матеріалу та матеріалу з фазовим переходом [156].

Кожен дослід повторюється чотири рази. На основі усереднених даних проводиться побудова графічних залежностей, представлених нижче.

Для досліджень було відібрано речовини, що можуть бути додані у якості складових частин майбутнього теплоакумулюючого матеріалу. Поєднання речовин у ємності 1 і ємності 2 наведені у таблиці 4.3. Порядковий номер кожного дослідів відповідає нумерації на рисунках представлених далі по тексту даного розділу.

Таблиця 4.3. Порядок проведення експериментальних досліджень.

№ експерименту	Ємність 1	Ємність 2
Дослід №1	вода	речовина PCM
Дослід №2	вода + антифриз	речовина PCM
Дослід №3	вода + NaHCO_3	речовина PCM
Дослід №4	вода+ NaHCO_3 +антифриз	речовина PCM
Дослід №5	вода+ NaHCO_3 +антифриз+кмц	речовина PCM
Дослід №6	вода+гуарова камедь (10гр.)	речовина PCM
Дослід №7	вода+гуарова камедь (1гр.)	речовина PCM
Дослід №8	вода+антифриз+гуарова_камедь(10гр.)	речовина PCM
Дослід №9	вода+ксантантова камедь (1гр.)	речовина PCM
Дослід №10	вода+антифриз+ксант_камедь(1гр)	речовина PCM

Для кожного зразка проведено 5 циклів «нагрів охолодження». За допомогою мікропроцесорного модуля «TRITON 6004TC» отримано графічні залежності зміни температури зразків протягом часу. На ґрунті яких побудовано залежності, що дають можливість оцінити ефективність застосування компонент.

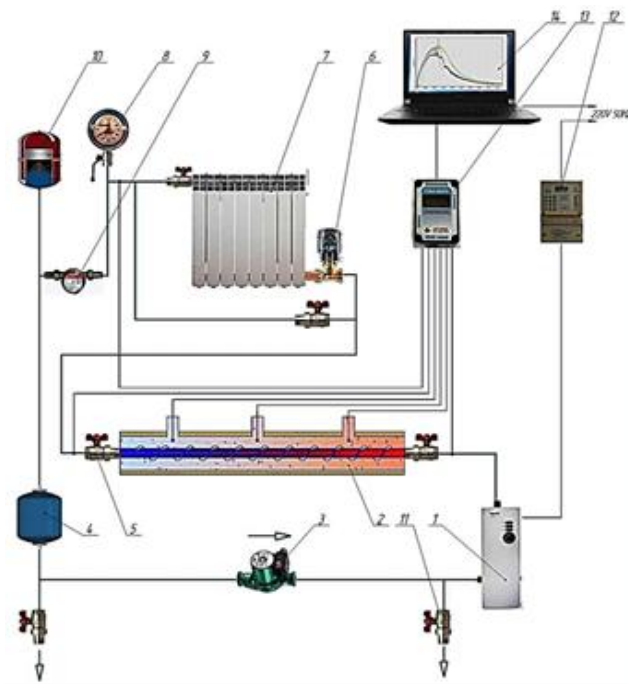
Дослід №1 обираємо як «контрольний», оскільки у якості теплоакумуючої рідини застосовано воду, теплофізичні характеристики якої відомі. Результат досліджень представлено в п.4.2.1.

Дослідження акумулюючої здатності теплоакумуючої рідини при циркуляції.

Об'єктом дослідження в даному експерименті є бінарні водні системи рідкої консистенції. Мета досліджень – пошук компонент рідинного теплоакумуючого теплоносія створеного на основі водорозчинних полімерів (далі WSP) [157].

Дослідження проводились у три етапи:

- на першому етапі експериментально-розрахунковим методом визначено величину питомої теплоти водних розчинів антифризу із додаванням WSP у якості теплоносія та проведено порівняння із водою;
- на другому етапі роботи, із застосуванням лабораторного стенда представлено на рис. 4.1.8 було проведено дослідження впливу WSP на ефективність використання енергії нагріву;
- на третьому етапі проведено дослідження залежності кількості запасеної теплоти протягом часу та від температури нагріву теплоакумуючої рідини.



а)



б)

Рис. 4.1.8. Принципова схема і фото стенду [49]:

1 – котел електричний КЕО-Б; 2 – теплообмінний пристрій типу «труба в трубі»; 3 – насос циркуляційний VILOJET з системою управління; 4 – буферна ємність; 5 – вентиль регулювальний; 6 – регулятор Danfoss A/S; 7 – радіатор охолодження води; 8 – термоманометр; 9 – лічильник витрати води (механічний); 10 – бак розширювальний Sprut VT-5; 11 – вентиль прохідний; 12 – лічильник витрати електроенергії; 13 – вимірювально-реєструючий прилад «TRITON 6004TC»; 14 – ПК.

Методика проведення досліджень.

Дослідження проводяться в діапазоні температур від 50 до 100 °С. Підведення та відведення тепла від теплообмінного пристрою 2 здійснюється за допомогою теплоносія, що циркулює в системі трубопроводів стенду. Швидкість потоку теплоносія у системі в межах 0,03...0,2 л/с (108...720 л/год) [49].

Модель теплового акумулятора представляє собою теплообмінник типу «труба в трубі» 2, де головний елемент - теплоізована металева труба діаметром 200 мм, довжиною 1000 мм з розташованою в ній спіральнооребреною трубою діаметром 32 мм, по якій циркулює теплоносій.

Міжтрубний простір заповнюється досліджуваним теплоакumuлюючою рідиною, крізь отвори в якому встановлені термоелектричні перетворювачі з'єднані з вимірювально-реєструючим приладом «TRITON 6004TC» 13 данні вимірювань з якого виводяться на екран ПК14. Розрахунки виконували за відомою методикою [158], яка дозволяє визначити об'єм і функціональну здатність акумулятора теплоти, максимальну кількість теплоти, що запасається та провести порівняльний аналіз HSM (heat storage materials, HSM).

Величина корисної теплоти, що виходить з акумулятора розраховується за методиками підібраними для кожного окремого джерела теплоти. Підхід до розрахунку різні в залежності від типу джерела заряджання теплового акумулятора - при використанні сонячної енергії, скидного тепла, створення запасів теплоти для покриття пікових навантажень та ін. Якщо процес здійснюється при постійному тиску, то кількість запасеної теплоти Q_s постійна і дорівнює ентальпії речовини. Класичний підхід до проведення розрахунків за тепловим навантаженням проводиться за

$$Q_s = m c_p \Delta T = \rho V c_p \Delta T \quad (4.1)$$

де Q_s – кількість запасеної теплоти, Дж; c_p – середня питома теплоємність речовини Дж/кг К; ρ – густина, кг/м³; V – об'єм акумуляційної речовини, м³; ΔT – різниця температур на вході та виході циркуляційного контуру нагріву/охолодження теплоносія, °C; m – маса речовини, кг.

Кількість запасеної теплоти прямо пропорційна масі та об'єму HSM, температурі зарядки і розрядки акумулятора, теплоємності та щільності акумулюючої рідини. Тому, підвищення ефективності акумулятора теплоти можна досягти впливом на зазначені параметри.

Збільшення об'єму та маси акумулятора економічно не доцільно. Підвищення температури заряду та зменшення температури розряду технологічно неможливо. WSP змінює в'язкість теплоносія, що дозволяє отримати кращий контакт рідкого HSM із поверхнею теплопередачі, що значно підвищує ефективність теплового акумулятора.

Більш інформативним показником є питома теплота Q_y [Дж / кг], яка для конкретної речовини є величиною постійною

$$Q_y = Q_s / m \quad (4.2)$$

Оскільки, втрати теплоти залежать від різниці температур між акумулятором теплоти та навколишнім середовищем, то важливим чинником є швидкість, з якою може охолоджуватися акумулятор, яка є функцією теплової дифузії. Окрім того, теплопровідність HSM значно впливає на час зарядки і розрядки та норму зберігання теплоти [159]. При використанні в якості HSM водних розчинів, за відсутності стратифікації в об'ємі теплового акумулятора, баланс енергії в ємності має вигляд

$$m c_p dt_s / dr = Q_u - Q_l - k_s \Delta T \quad (4.3)$$

де Q_u і Q_l - теплота трансформації енергії від джерела теплоти до HSM, Дж; k_s – коефіцієнт втрат теплоти ємності, який залежить від площі поверхні акумулятора теплоти.

Стратифікація негативно впливає на кількість корисної теплоти, яку можна отримати від акумулятора теплоти, зменшуючи її на 25...30%. Необхідний запас теплової енергії вибирається керуючись забезпеченням надійності, можливості компенсації непередбачених перебоїв надходження енергії, наявності або плануванні резервних джерел, обмеженням по вартості та інше, і приймається на рівні 70...80% від Q_s .

Якщо температуру HSM відомо, можна оцінити інші залежні від температури параметри [160]. Рівняння (4.3) може бути використане, щоб визначити T_s - температуру бінарної водної системи HSM, як функцію часу.

$$T_s = T_1 + \Delta\tau / m c_p [Q_u - Q_l - k_s \Delta T], \quad (4.4)$$

де τ - час, хв.

Важливим чинником є енергетична ефективність системи акумуляції. Висока ефективність досягається потужністю системи, повнотою використання енергії і зниженням витрат палива для нагріву HSM.

У загальному випадку ефективність системи акумуляції може бути

визначена, як співвідношення кількості отриманої теплоти Q_u до кількості витраченої на її виробництво енергії N

$$\eta_s = Q_u / N \quad (4.5)$$

Представлені розрахункові залежності підтверджуються отриманими експериментальними даними і можуть бути використані при проектуванні та виборі оптимального режиму роботи акумулятора теплоти. Розглянута методика є відносно простою, але існує ймовірність отримати результат з значною похибкою, тому приведений розрахунок може бути використаний тільки як інженерний.

Для досліджень використовували:

1. Вода – «контрольний зразок», (HSM 1 зразок 1) відповідає вимогам [161] або технічна вода.

2. Бінарна водна система з 33% водним розчином антифризу (HSM 2 зразок 2). Для досліджень використали антифриз торгової марки «Дефриз».

3. бінарна водна система (HSM 3, зразок 3):

70% вода + 29% дефриз + 1 % WSP;

4. бінарна водна система (HSM 4, зразок 4): вода з додаванням 1% WSP, який є водним розчином природних полісахаридів із ефірами целюлози рослинного походження. WSP має стабільні властивості в широкому діапазоні температур (від -18 °C до 120 °C) і кислотності (від 2 до 12 pH). Проведені дослідження показали, що ці унікальні за реологічними властивостями рідини, в розчинах солей високої щільності здатні в певному температурному інтервалі не знижувати, а в деяких сольових розчинах навіть збільшувати ефективну в'язкість розчинів при підвищенні температури [162]. Результат досліджень представлено в п.4.2.1.

Дослідження питомої теплоємності теплоакумуючої рідини і матеріалів з фазовим переходом.

Дослідження теплоємності ТАМ проводились у Лабораторія теплометрії ІТТФ НАН України з використанням диференціального

мікрокалориметра ДМКИ-1, основні технічні характеристики і фото наведені в таблиці 4.4 та рис. 4.1.9

Таблиця 4.4. Основні технічні характеристики диференціального мікрокалориметра ДМКИ-1, (дані наведено лише для теплоємності).

Характеристика	Значення
Температурний діапазон, °C	30...105
Максимально допустима маса зразка, г	25
Межі основної абсолютної похибки зважування, г	0,05
Похибка визначення питомої теплоємності (для хімічно-чистих матеріалів), %	2,5



Рис. 4.1.9. Диференціальний мікрокалориметр ДМКИ-1.

Дослідження проводились з метою визначення залежності зміни питомої теплоємності зразків речовин від температури. Для отримання даних про теплоємність проведено цикл з трьох досліджень для кожного зразка за однакових умов проведення експерименту. Отримані дані для кожного матеріалу представлені як середнє значення теплоємності матеріалу в температурному діапазоні від 30 до 90 °C.

Вимірювання питомої теплоємності зразків виконано відповідно до методики викладеної в [167]. Зразок розміщувався в робочій комірці

приладу та зважувався, після чого обидві комірки приладу закривалися паронепроникною мембраною, в якій голкою виконано два отвори напроти центрів робочої комірки та комірки-референта. Отвори дозволяють вирівнювати тиск між газовим середовищем комірок та робочої камери протягом дослідження одночасно запобігаючи випаровуванню рідини зі зразка.

Дослідження проводилось в умовах періодичного підвищення температури зразка. Весь температурний діапазон дослідження поділено на однакові інтервали (кроки) достатньої тривалості для встановлення в робочій камері системи рівноважного стану та його підтримування протягом не менше 10 хв. При підвищенні температури нагрівників до температури наступного інтервалу сенсорами теплового потоку комірок фіксується кількість теплоти, яку витрачено на нагрівання робочої комірки зі зразком та комірки-референта до заданої інтервалом температури [167].

Значення питомої теплоємності для окремо взятого інтервалу обчислюється за наведеною формулою:

$$c = 1/m \cdot \left[\int_{\tau_1}^{\tau_2} \Delta Q(\tau) d\tau / \Delta T + \Delta C_{БАЛ} \right], \text{ Дж/кг} \cdot \text{К} \quad (4.6)$$

де m - маса досліджуваного зразка; ΔQ - різниця теплових потоків, що реєструються робочою коміркою та коміркою-референтом за час від τ_1 до τ_2 (тривалість інтервалу); ΔT - різниця значень температури між інтервалами; $\Delta C_{БАЛ}$ - параметр, який враховує неідентичність теплофізичних властивостей робочої комірки і комірки-референта [167].

Вимірювання питомої теплоємності проводились для діапазону температури зразка від 30 до 100 °С; 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. Результати досліджень теплоємність зразків з різними термінами експлуатації представлено у п.п. 4.2.2.

Дослідження водневого показника теплоакумуючої рідини при зміні температури.

Значення водневого показника важливий параметр, що визначає активність і агресивність досліджуваних зразків теплоакумуючої рідини проводили за визначеними методиками [168-169].

Нагрівання досліджуваних зразків теплоакумуючої рідини проводили у водяній бані, де поступово підвищували температуру у зазначеному діапазоні.

Зміну водневого показника зразків теплоакумуючої рідини в діапазоні температур 20 - 100°C визначали за допомогою рН-метра HI 9321 HANNA Instruments.

Дослідження густини теплоакумуючої рідини при зміні температури.

Зміну густини зразків теплоакумуючої рідини в залежності від температури (20–90°C) визначали за допомогою комплекту лабораторних ареометрів АОН–1 (ГОСТ 1848-81)

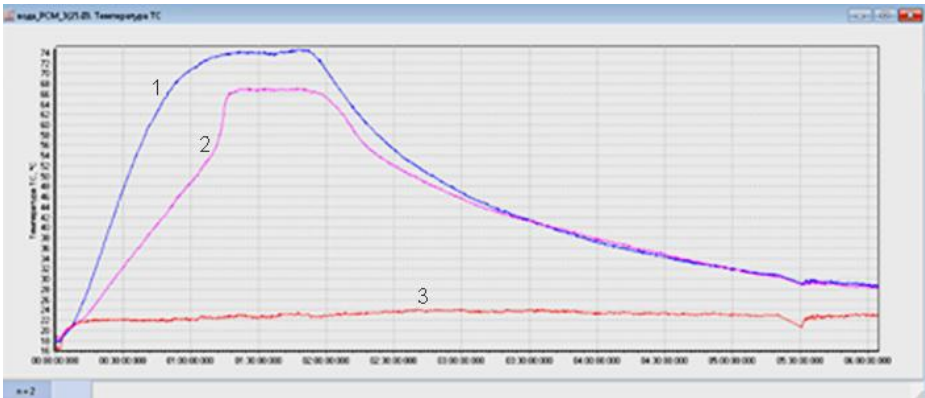
4.2. Дослідження теплофізичних параметрів теплоакumuлюючої рідини на основі водорозчинних високомолекулярних вуглеводнів рослинного походження

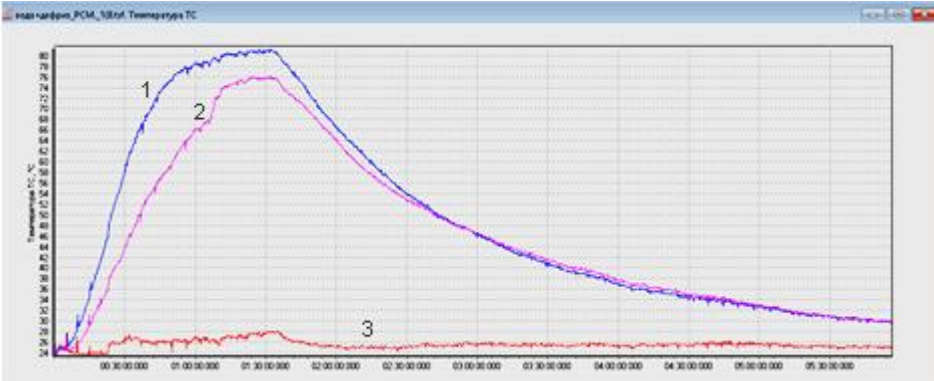
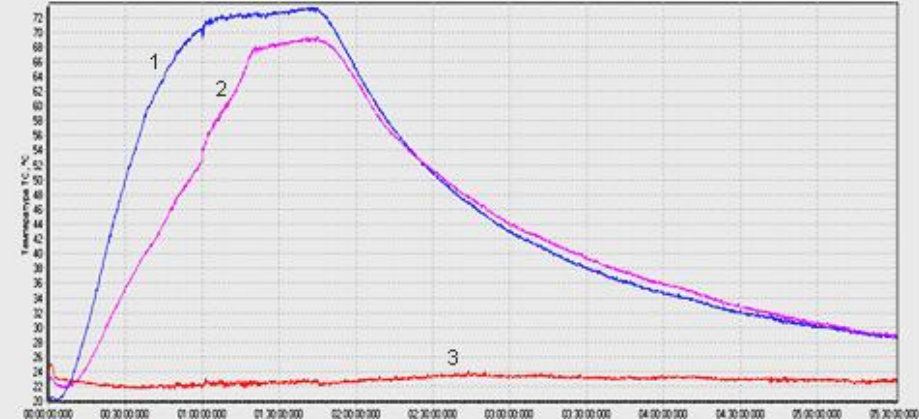
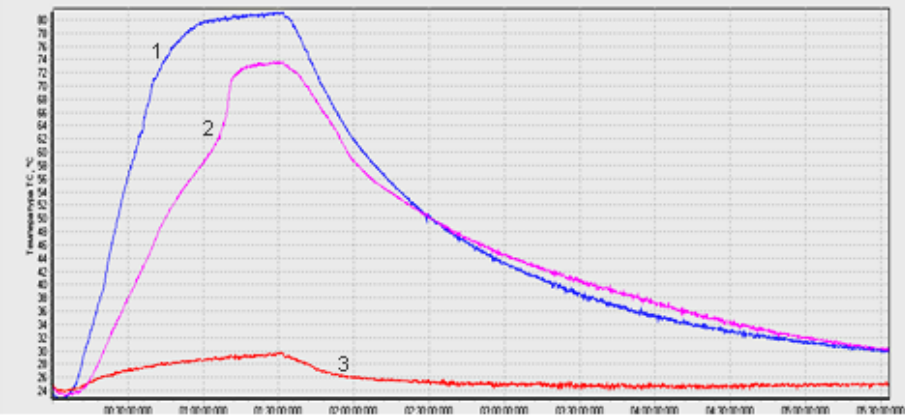
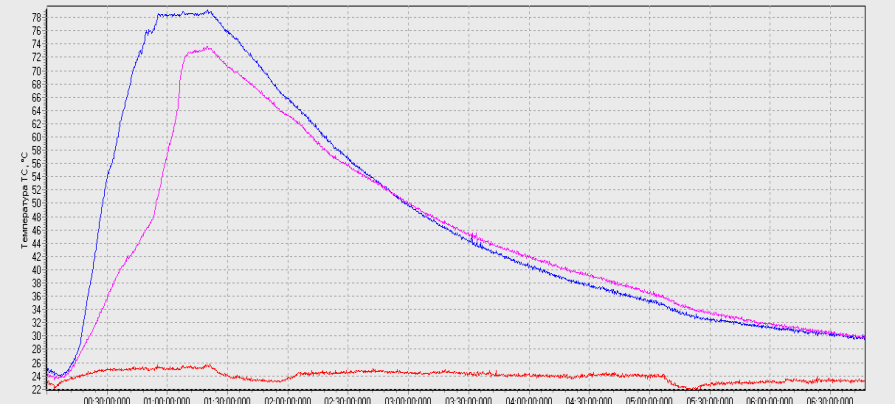
4.2.1. Дослідження швидкості нагріву/охолодження теплоакumuлюючої рідини при розташування в ємності та циркуляції в діапазоні температур від 30 до 120°C

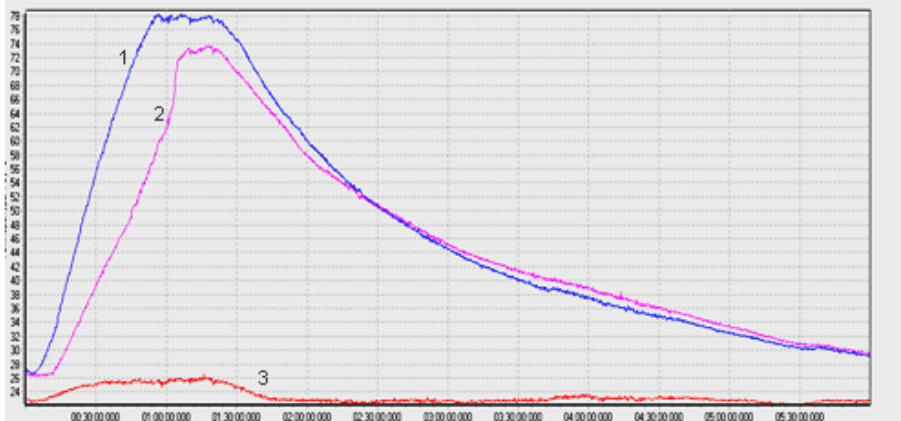
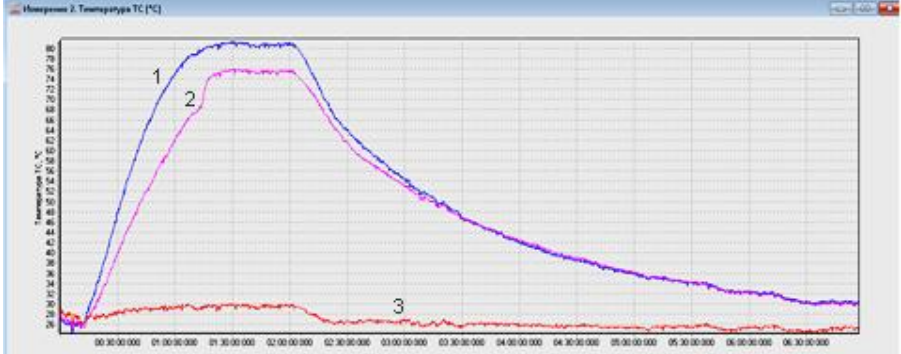
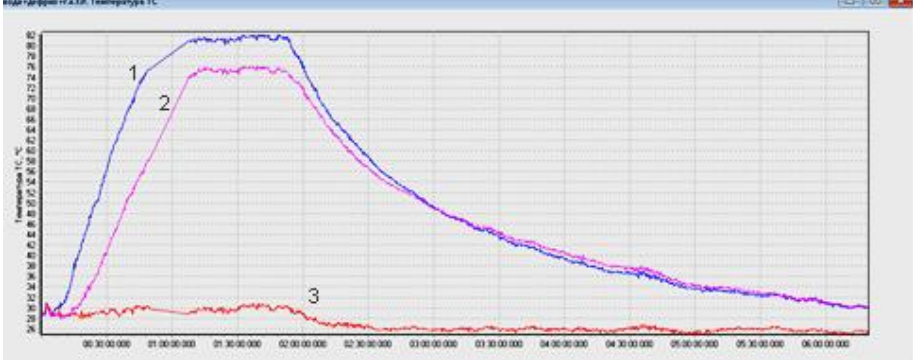
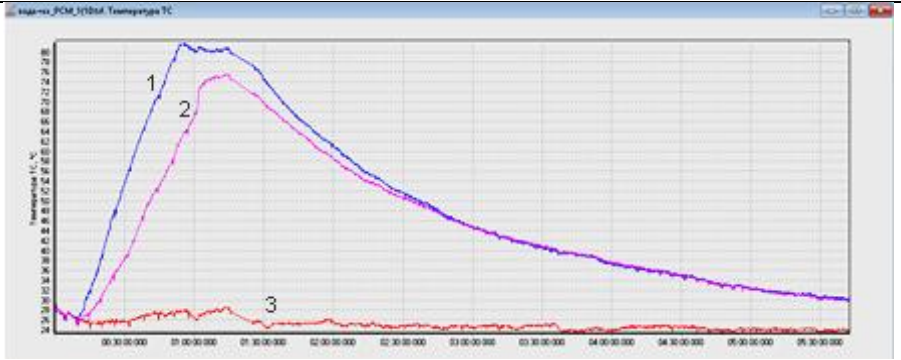
Дослідження швидкості нагріву/охолодження теплоакumuлюючої рідини при розташування в ємності в діапазоні від 30 до 120°C.

Вибір складових теплоакumuлюючої рідини представлено в таблиці 4.5. Дослідження проводились згідно нумерації таблиці 4.3.

Таблиця 4.5 Результати експериментальних досліджень впливу складових теплоакumuлюючої рідини при термоциклуванні методом T-history

Типовий вигляд термоциклування	Порядок проведення експериментальних досліджень
1	2
	Дослід 1 1 – теплоакumuлююча рідина; 2 – РСМ; 3 – температура оточуючого середовища.

1	2
	Дослід 2 1 – теплоакуюча рідина; 2 – РСМ; 3 – температура оточуючого середовища.
	Дослід 3 1 – теплоакуюча рідина; 2 – РСМ; 3 – температура оточуючого середовища.
	Дослід 4 1 – теплоакуюча рідина; 2 – РСМ; 3 – температура оточуючого середовища.
	Дослід 5 1 – теплоакуюча рідина; 2 – РСМ; 3 – температура оточуючого середовища.

1	2
	Дослід 6 1 – теплоакуюча рідина; 2 – РСМ; 3 – температура оточуючого середовища.
	Дослід 7 1 – теплоакуюча рідина; 2 – РСМ; 3 – температура оточуючого середовища.
	Дослід 8 1 – теплоакуюча рідина; 2 – РСМ; 3 – температура оточуючого середовища.
	Дослід 9 1 – теплоакуюча рідина; 2 – РСМ; 3 – температура оточуючого середовища.

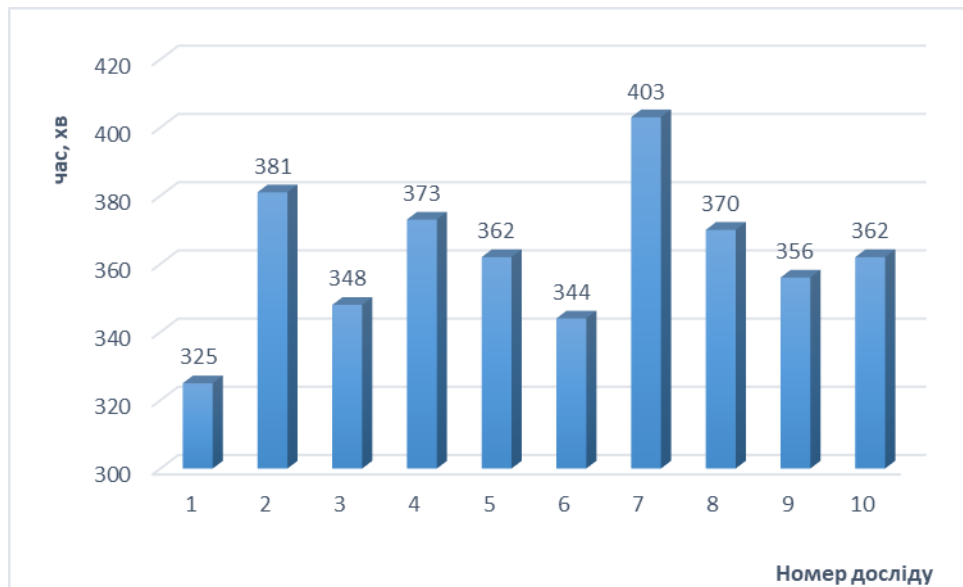
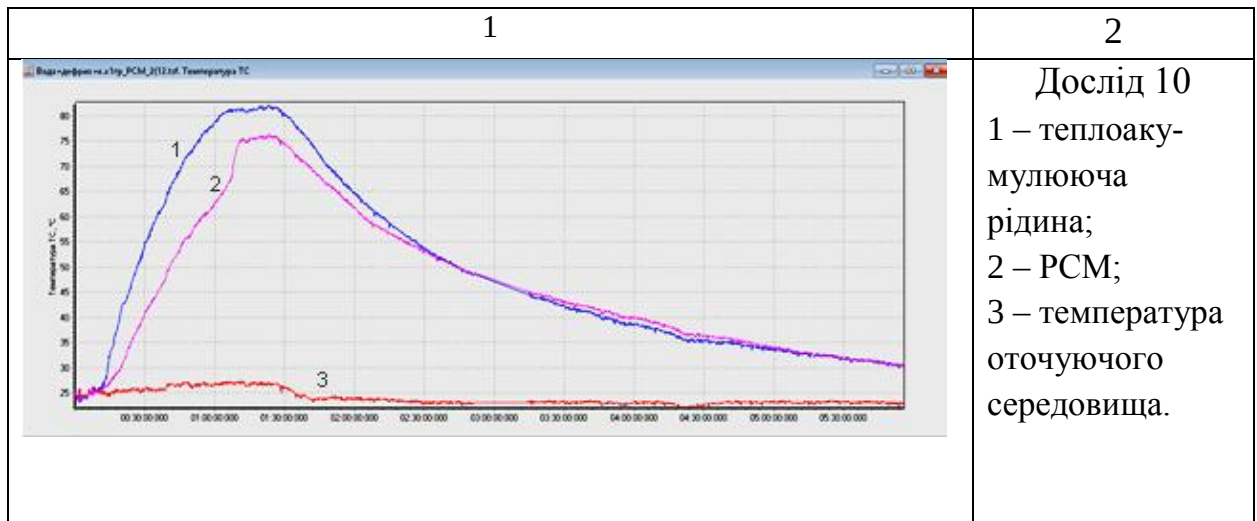
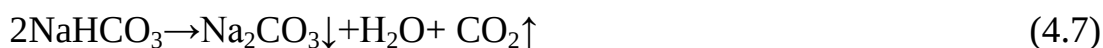


Рис. 4.2.1. Середня тривалість циклу нагріву-охолодження [48].

Час експерименту включає час нагріву та час охолодження – це дорівнює одному циклу, рис.4.2.1. З рисунку видно, що найкоротший час циклу у Досліді №1 де вода нагрівала PCM. Це можна пояснити аномально високою питомою теплоємністю у порівнянні з будь якою іншою рідиною. У Досліді №2 воду замінили на теплоакуючу рідину з води і антифризу, що 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 Дослиди № 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 теплоакумуючої рідини і різкий запах, що унеможливило використання соди як компоненти. В Дослідах №9 і №10 час циклу збільшено на 9,5 % та 11,4 %, відповідно [48].

В результаті проведених досліджень було експериментально отримано час циклу «нагріву-охолодження» для кожної з теплоакумуючих речовин. Також встановлено, що застосовувати NaHCO_3 не безпечно, оскільки з підвищенням температури відбувається інтенсивне виділення CO_2 , що унеможливило застосування харчової соди, як складника у теплоакумуючій рідині з точки зору безпечності застосування. Також, випадає осад, що негативно впливає на процес теплопередачі [163, 164]



Подальші дослідження дозволили оцінити співвідношення витраченої енергії на кожен цикл «нагріву-охолодження», рис. 4.2.2.

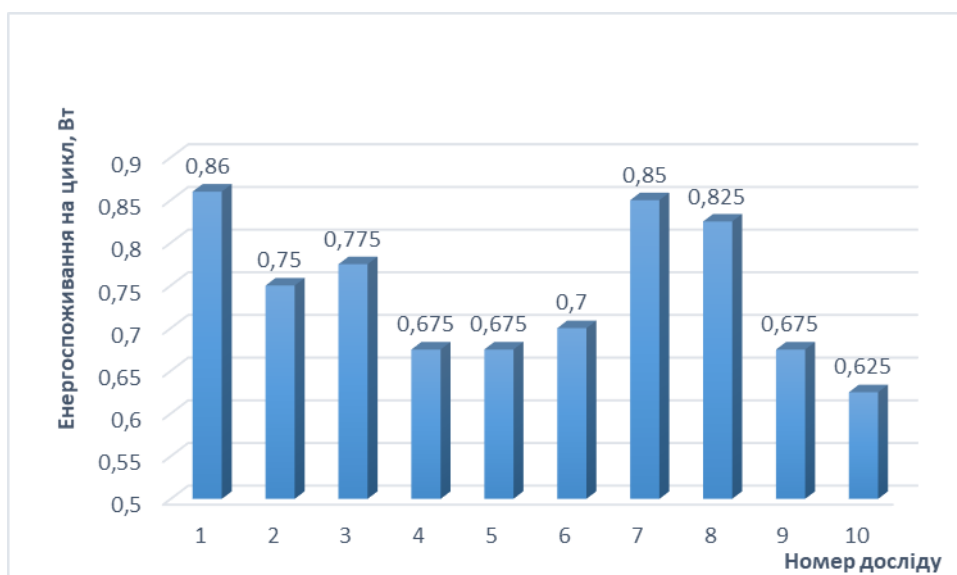


Рис. 4.2.2. Усереднене значення споживання енергії теплоакумуляційної рідини за цикл [48].

Максимальне енергоспоживання на цикл, рис. 4.2.1. зафіксовано у Досліді №1 де вода нагріває РСМ, найменше енергоспоживання на цикл у Досліді №10, де до складу теплоакумуляційного матеріалу входить антифриз

і ксантанова камедь 1 %. Різниця між даними дослідками становить 27,3 %, що є суттєвою різницею для пересічного споживача і неприпустимою для промисловості [48].

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 .

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

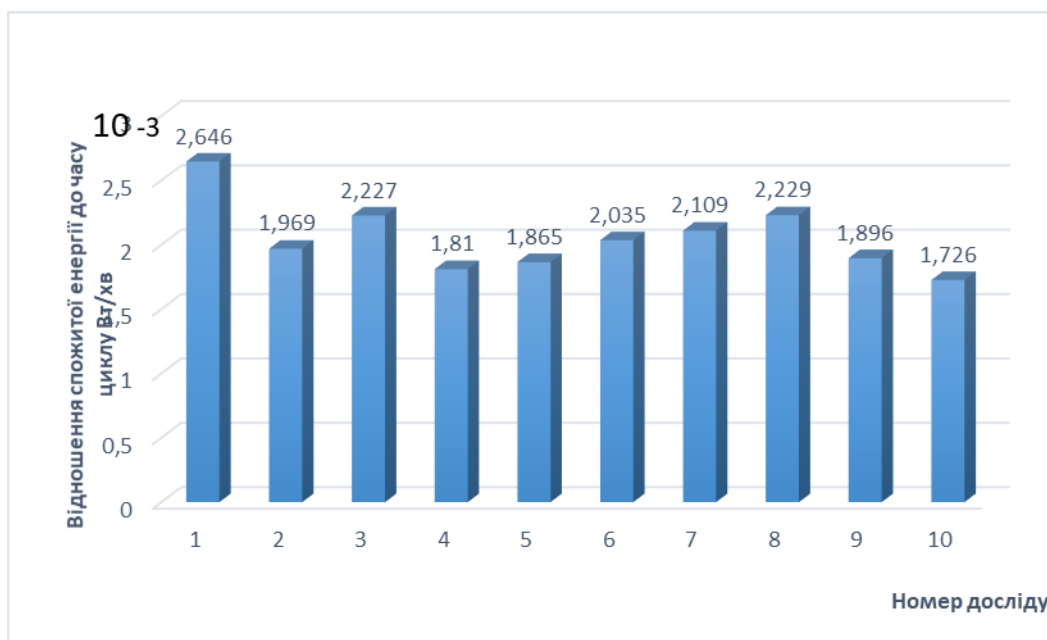


Рис. 4.2.3. Відношення спожитої енергії до тривалості циклу нагріву-охолодження, Вт/хв [48].

Співвідношення витраченої енергії до часу проведення циклу «нагріву-охолодження» дозволяє оцінити ефективність роботи теплоакumuлюючої рідини, рис. 4.2.3. Отже, 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.

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.

Проведені експериментальні дослідження дозволили зробити висновки:

- теплоакumuлююча рідина, окрім води і антифризу має містити гуарову камедь, оскільки вони дозволяють створити речовину, що значно продовжує 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 40 циклів, що заповнює «теплове ядро» в конструкції M-TES, відбуваються зміни в масі PCM до 2%, що свідчить про безпечність і надійність його використання [48].

В результаті проведених експериментальних досліджень встановлено доцільність використання у складі теплоакumuляційного матеріалу – воду, антифриз, ксантанову і гуарову камеді. Визначення концентрацій зазначених величин стануть предметами подальших досліджень [48].

Також підтверджено безпечність застосування церезину у «тепловому ядрі», шляхом дослідження зміни маси до і після термоциклювання.

Дослідження швидкості нагріву/охолодження теплоакumuлюючої рідини при розташування в ємності і циркуляції в діапазоні від 30 до 120°C

На першому етапі досліджень була встановлена питома теплота Q_y для теплоносіїв HSM 1, HSM 2 та HSM 3. По формулам (4.1) та (4.2) були проведені розрахунки, попередньо експериментально визначено маси теплоносіїв в однаковому об'ємі. Були використані довідкові дані та проведено зважування зразків. Результати представлено на рисунку 4.2.4.

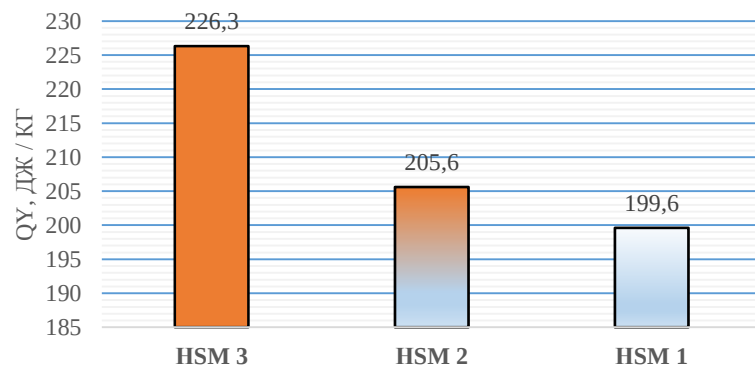


Рис. 4.2.4. Питома теплота Q_y бінарних водних систем [157].

Експериментальні дослідження свідчать, що додавання дефрізу покращує у питому теплоту порівнянні із водою на 3,0%, а подальше додавання WSP підвищує Q_y майже на 12%.

Для перевірки отриманих розрахунками результатів, було проведено лабораторне дослідження впливу додавання водного розчину 1% WSP на ефективність акумуляції теплоти та зменшення розходу електричної енергії для нагріву теплоносія та HSM. Отримані результати приведено на рис. 4.2.5.

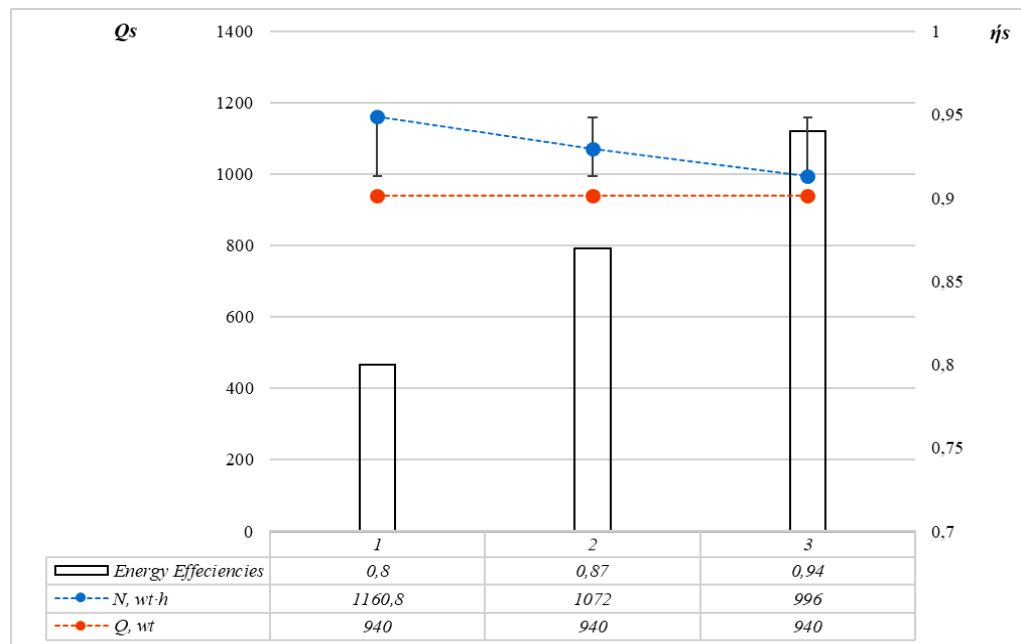


Рис. 4.2.5. Вплив додавання водного розчину 1% WSP на ККД теплового акумулятора та властивості теплоносія, де : 1 - вода, 2 – вода із WSP (HSM 4), та 3 - HSM 4 у контурі циркуляції теплоносія та у акумуляторі теплоти [157].

Дослідження проводилися на експериментальному стенді (рис.4.2.5.). За показниками лічильників, порівнювалася витрата електричної енергії на виробництво однакової кількості теплоти, яка вимірювалася тепломіром. Проведення розрахунків за тепловим навантаженням проводиться за формулою (4.1), перевірка отриманих результатів проводилися аналітичними розрахунками по формулі (4.3), розрахунок ККД по формулі (4.5). Як можна бачити додавання водного розчину водорозчинних полімерів у кількості 1% від загального об'єму призводить до зменшення споживання електричної енергії на нагрів теплоносія на 7% і підвищує ККД системи акумуляції загалом на 14% [157].

При проведенні третього етапу досліджень отримано залежності кількості запасеної теплоти Q_s протягом часу в ємності моделі акумулятора теплоти та залежності кількості запасеної теплоти Q_s від температури. В контурі нагріву в якості теплоносія використали HSM 4.

Функції для опису математичних моделей можуть бути задані як аналітичним способом, так і табличним, при якому функція відома тільки при визначених дискретних значеннях аргументу. Функціональні залежності отримані в результаті розрахунків задаються табличним способом [157].

Аналіз отриманих результатів проводили шляхом визначення коефіцієнта нахилу прямої використаної для апроксимації даних методом лінійної регресії. Коефіцієнт нахилу дорівнює тангенсу кута між прямим і позитивним напрямом осі ординат. Для визначення нахилу використовують дві будь-які точки на прямій. При цьому, обчислюється частка від ділення довжини відрізка, отриманого при проектуванні цих двох точок на вісь ординат, а саме на довжину відрізка, утвореного проекціями цих же двох точок на вісь абсцис. Якщо значення коефіцієнта відомо, то можливо розрахувати швидкість зміни даних уздовж лінії регресії [157].

На рис. 4.2.6 представлено залежність кількості запасеної теплоти в акумуляторі в залежності від часу зарядки. Як можна бачити, найнижчі показники має вода - HSM 1, а найвищий результат - HSM 3. Додавання 1%

WSP в бінарну систему вода-дефриз значно підвищує теплоакумуючу здатність системи. Речовина HSM 2 займає проміжне положення.

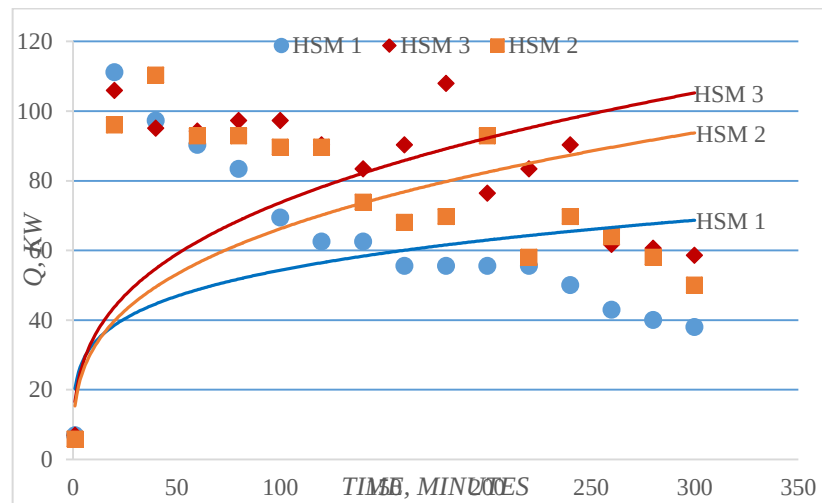


Рис. 4.2.6. Кількість запасеної теплоти T_A в залежності від часу зарядки [157].

На рис. 4.2.7. представлені залежності кількості запасеної теплоти Q_s від температури. Тут також найкращі результати притаманні системи HSM 3.

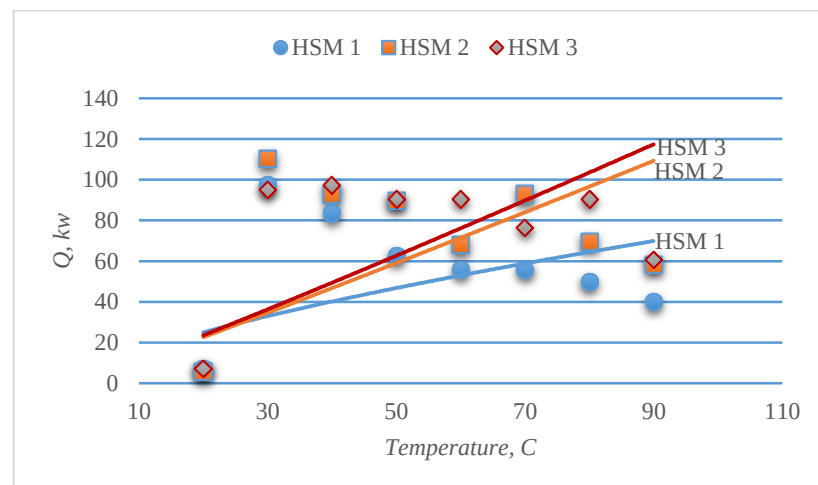


Рис. 4.2.7. Залежність кількості запасеної теплоти від температури [157].

Необхідно відзначити, що з найбільшою вірогідністю $R^2 = 0,7...0,9$, процес швидкості набору температури та залежності кількості запасеної теплоти від температури теплоносія при найменшій витраті енергії найкраще описується степенною функцією виду $Y = aX^n$. Можна зробити висновок, що

питома теплота, швидкість акумуляції та об'єм запасеної теплової енергії залежить від щільності розчину бінарної водної системи, і регулюється додаванням водорозчинних полімерів [157].

Питома теплота, яка є постійною величиною, для бінарних водних систем HSM 1, HSM 2 та HSM 3 значно збільшується із додаванням водорозчинних полімерів. На думку авторів, це пов'язано із перетворенням водного розчину в псевдопластичну рідину. При проведенні десяти термоциклів HSM 2, HSM 3 та HSM 4 теплофізичні показники температури залишалися стабільними. Це свідчить про те, що склад теплоносіїв підібрано вірно.

При проведенні серії експериментів встановлено, що процес нагріву (до 90°C) використання HSM 3 у якості теплоносія найбільш швидкий та економічно вигідний у порівнянні з водою та рідиною HSM 2. При цьому встановлено, що швидкість нагріву (до 90°C) у HSM 3 найшвидша і перевищує таку для HSM 2 майже на 25%, що дозволяє зробити припущення що додавання WSP покращує значення коефіцієнту теплопередачі. Додавання тільки 1% WSP в бінарну водну систему значно підвищує теплоакумулюючу здатність системи в цілому. При використанні водного розчину із додаванням WSP було отримано найбільший ККД теплового акумулятора у порівнянні із водою та антифризом. Це дало змогу на 7% зменшити витрату електричної енергії при використанні HSM у якості теплоносія та 14% при додаванні WSP в об'єм теплового акумулятора [157].

Створену теплоакумулюючу рідину було використано у якості робочого тіла у ємнісних акумуляторах мобільного теплового акумулятору МТА-0,5МВт. Контрольне дослідження теплоакумулюючої рідини було проведено через рік експлуатації. Результати досліджень представлено на рис. 4.2.8.

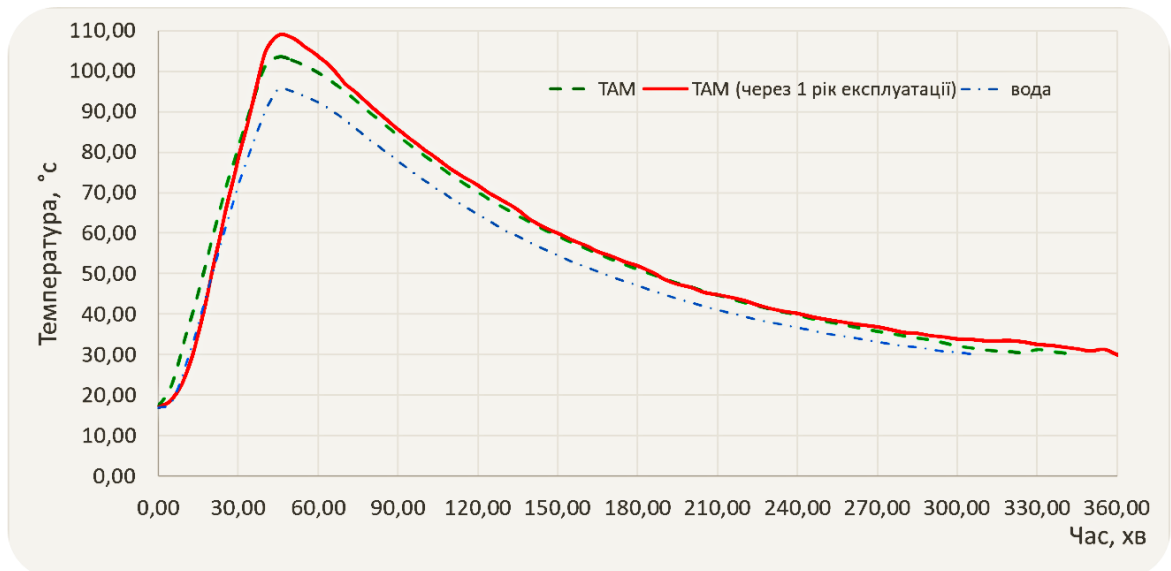


Рис. 4.2.8. Дослідження тривалості циклу при термоциклуванні методом T-history [165].

Отримані результати свідчать про ефективність створеної теплоакумуючої рідини через рік експлуатації у порівнянні з контрольними зразками води і теплоакумуючої рідини до експлуатації. Це пояснюється однорідністю структури водорозчинного полімера.

4.2.2. Дослідження зміни теплоємності теплоакумуючої рідини

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

Для досліджень питомої теплоємності відібрали [166]:

- воду, як контрольний зразок (зразок №1);
- теплоакумуюча рідини після 4 опалювальних сезонів (зразок №2);
- теплоакумуюча рідини після 2 опалювальних сезонів (зразок №3);
- теплоакумуюча рідини до термоциклування, тільки створена (зразок №4).

Результати досліджень теплоємності зразків з різними термінами експлуатації представлено на рис. 4.2.9.

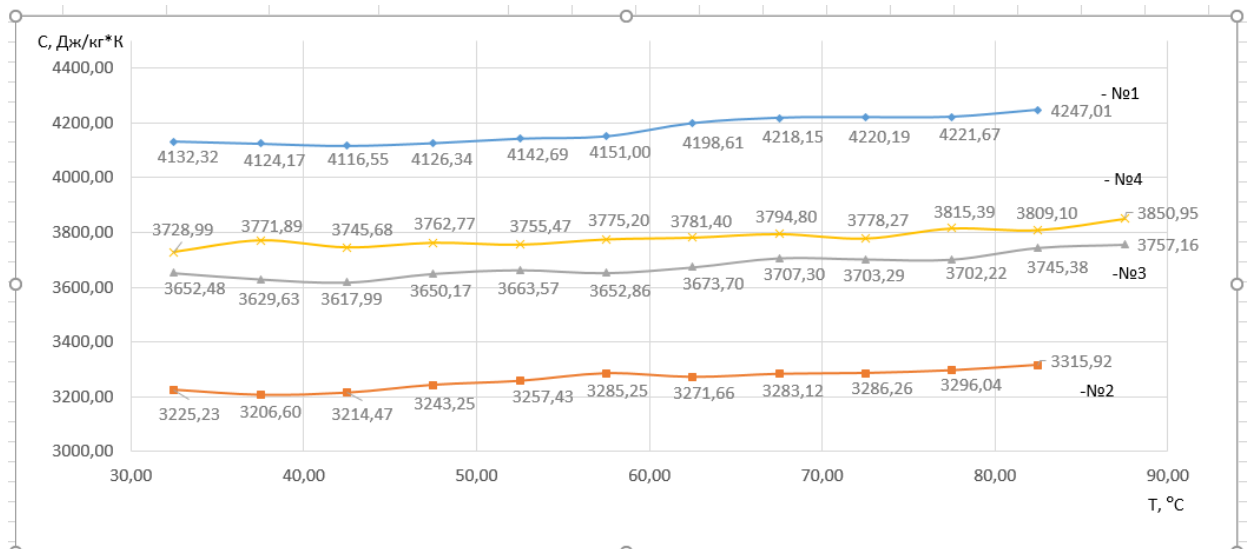


Рис. 4.2.9. Зміна питомої теплоємності теплоакуючої рідини в залежності від температури [166]: 1 – вода (контрольний зразок), 2 – ТАМ після 4 опалювальних сезонів, 3 – ТАМ після 2 опалювальних сезонів, 4 – ТАМ до термоцикування.

За результатами досліджень питомої теплоємності теплоакуючого матеріалу у порівнянні з водою, ТАМ до термоцикування має меншу теплоємність у межах від 9,35 до 10,3 %. Також встановлено, що відбувається поступове зниження теплоакуючої здатності зразків ТАМ. 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 ТАМ до термоцикування. Отже, строк експлуатації теплоакуючого матеріалу у теплових акумуляторах ємнісного типу об'ємом 1,5 м³ не менше 2÷4 років.

4.2.3. Дослідження водневого показника теплоакуючої рідини при зміні температури

Для досліджень питомої теплоємності відібрали воду, як контрольний зразок (№1), зразок ТАМ після 4 опалювальних сезонів (№2), зразок ТАМ після 2 опалювальних сезонів (№3) та тільки створений ТАМ до термоцикування (№4). Результати досліджень наведено у таблиці 4.6 та на рис. 4.2.10 [142].

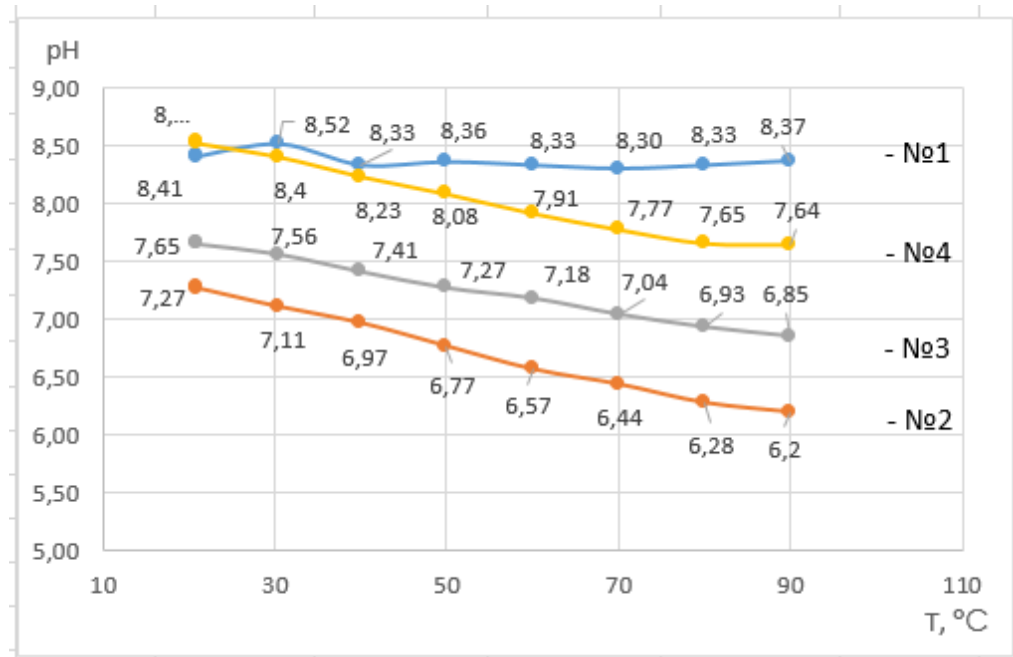


Рис. 4.2.10. Зміна водневого показника теплоакумуючої рідини в залежності від температури: 1 – вода (контрольний зразок), 2 – ТАМ після 4 опалювальних сезонів, 3 – ТАМ після 2 опалювальних сезонів, 4 – ТАМ до термоцикування [142].

Встановлено, що не зважаючи на термін експлуатації теплоакумуючої рідини, досліджувані середовища залишаються нейтральними, на відміну від зразку №1 (води). Зразок 1 демонструє рН показник лужного середовища. Отже, водневий показник не має обмежувального характеру на експлуатаційні характеристики теплоакумуючої рідини і може використовуватись до 4 опалювальних сезонів.

Таблиця 4.6 Зміна рН теплоакумлюючого матеріалу в залежності від температури [142].

Температура, °C	Нумерація зразків							
	№1		№2		№3		№4	
	фактична Т, °C	рН	фактична Т, °C	рН	фактична Т, °C	рН	фактична Т, °C	рН
вихідна	21.0	8.40	23.0	7.26	22.6	7.65	22.2	8.52
20	21.0	8.41	22.5	7.27	20.0	7.65	20.2	8.52
30	30.5	8.52	30.2	7.11	30.4	7.54	30.0	8.40
40	40	8.33	40	6.97	40.6	7.41	40.0	8.23
50	49.9	8.36	50.1	6.77	50.0	7.27	50.0	8.08
60	60	8.33	60.7	6.57	60.0	7.18	60.5	7.91
70	70	8.30	70.4	6.44	70.0	7.04	70.0	7.77
80	80	8.33	80.1	6.28	80.0	6.93	80.0	7.65
90	90	8.37	85.3	6.20	87.7	6.85	85.3	7.64

4.2.4. Дослідження густини теплоакумулюючої рідини при зміні температури

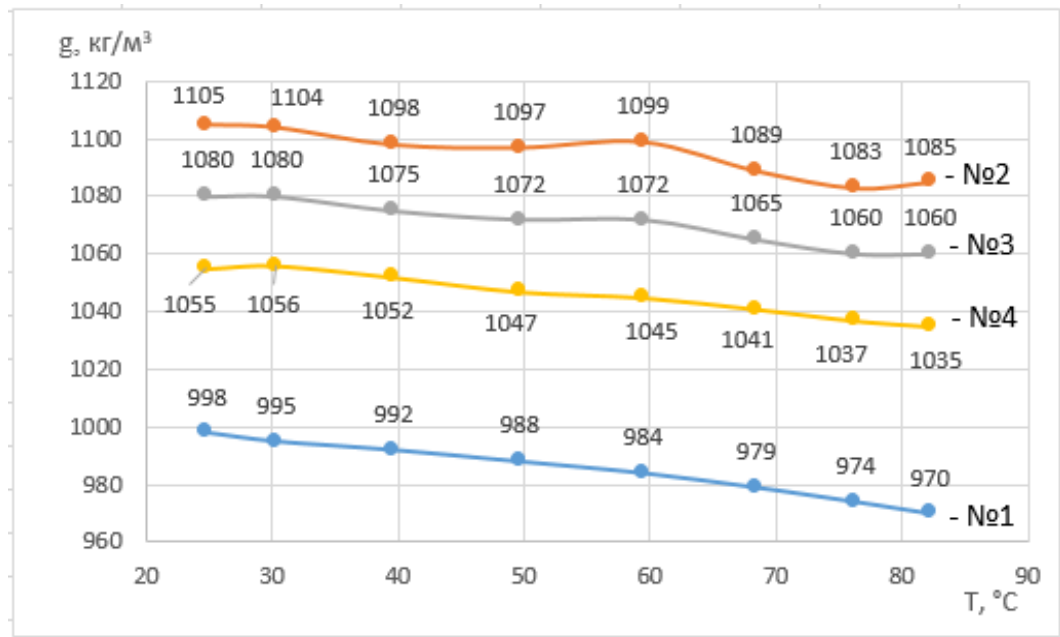


Рис. 4.2.11. Зміна густини теплоакумулюючої рідини в залежності від температури:

1 – вода (контрольний зразок), 2 – ТАМ після 4 опалювальних сезонів, 3 – ТАМ після 2 опалювальних сезонів, 4 – ТАМ до термоциклування [142].

Дослідження густини теплоакумулюючої рідини свідчать про не суттєві зміни в процесі експлуатації. Так при одному циклі підвищення температури від 20 до 90°C, зміни складають до 1–2%. Зміни густини теплоакумулюючої рідини при тривалій експлуатації відбувається в межах 1–2%. Це свідчить про стабільність утворених структур в теплоакумулюючій рідині і відсутність змін у вказаному параметрі. Отже, використання теплоакумулюючої рідини не має обмежуючого впливу на експлуатаційні характеристики протягом 4 опалювальних сезонів [142].

4.3. Технічні характеристики теплоакumuлюючої рідини

В результаті проведених досліджень створено теплоакumuлюючу рідину з технічними характеристиками зазначеними в таблиці 4.7. Фото теплоакumuлюючої рідини представлено на рис. 4.2.12.

Результати досліджень підтверджено патентом України на винахід «Акумуляційна рідина для систем опалення та охолодження» [51].

Таблиця 4.7 Технічні характеристики теплоакumuлюючої рідини

Технічні показники	Теплоакumuлююча рідина
Колір розчину	Жовто лимонний
Густина кг/м^3	1009 ÷ 1075
Температура замерзання, $^{\circ}\text{C}$	-18
Температура кипіння, $^{\circ}\text{C}$	+120
Робочий діапазон температур, $^{\circ}\text{C}$	-15...+120
Питома теплоємність, $\text{Дж/кг}\cdot\text{K}$	3600÷3800
Водневий показник, pH	7,3...8,1
Корозійний вплив на метали г/м^2 доб	0,02....0,03



Рис. 4.2.12. Зразок універсальної теплоакumuлюючої рідини

Сфера застосування – це процеси нагріву та охолодження теплоносія, теплові труби, конвекція, системи зберігання енергії, фотоелектричні модулі, теплообмінники та інше. Переваги: зменшення витрат палива та електричної енергії на виробництво 1,0 Гкал теплоти на 7-14 % у порівнянні зі звичайною водою. Впроваджено: ІТТФ НАН України, м. Київ, вул. Марії Капніст 2а

4.4. Створення технології приготування теплоакumuлюючої рідини. Мобільний технологічний комплекс

В процесі створення теплоакumuлюючої рідини з подальшим застосуванням у ємкісних акумуляторах, проведено комплекс досліджень в яких змінювалась концентрація водорозчинних полімерів на рослинній основі від 1гр до 10 гр сухих компонент. Було помічено що при розчиненні у воді КМЦ, гуарової та ксантанової камеді не можливо створити однорідний розчин. При додаванні їх у воду чи суміш води і антифризу, утворюються закапсульовані агломерати, які навіть при нагріванні і перемішуванні розчину не мають однорідного стану. Зі збільшенням концентрації водорозчинних полімерів до 10гр÷30гр сухих компонент на 1 л розчину рівномірне розчинення взагалі не можливе.

Найкращим і найбільш розповсюдженим розчинником є вода [167,168], яка використовується у майже всіх наявних технологічних процесах на різних етапах. Але при проведенні процесу розчинення необхідно враховувати не лише фізико-хімічні та мікробіологічні показники, а й аномалії води [169,170]. При створенні теплоакumuляційної рідини застосовували у якості розчинників воду та дефриз [52].

Водорозчинні полімери складно розчиняються у воді і без підвищення температури розчину чи розчинника, досягнути однорідності рідини водорозчинних полімерів майже неможливо. Є три методи розчинення ВРП [171]:

1. Гаряче розчинення - воду необхідно нагріти до температури кипіння $\approx 97\text{ }^{\circ}\text{C}$. На стінах ємності вище рівня води спостерігається конденсація пари, в результаті відбувається небажане осідання порошку сухих речовин ВРП. Щоб запобігти осадженню, нагріту воду енергійно перемішують для створення вирви у об'ємі рідини (частота мішалки $\sim 500 - 600\text{ об/хв}$). В результаті перемішування рівень води піднімається, як наслідок зникне конденсаційний шар на стінках ємності, а ВРП розповсюджується по всьому об'єму. Після інтенсивного перемішування, необхідно зменшити частоту перемішування мішалки до $50-60\text{ об/хв}$ і вимкнути джерело нагрівання, перемішування продовжити до досягнення однорідної консистенції розчину.

2. Повне розчинення - застосовується для незначного об'єму приготування розчину і потребує мінімальної кількості обладнання. Такий спосіб відбувається за рахунок диспергування ВРП у рідинах, що змішуються з водою, але не розчиняють сухі речовини ВРП. При додаванні розчинник сухих речовин ВРП у воду кожна окрема частинка гідратує утворюючи однорідний розчин.

3. Застосування для розчинення спиртів у якості розчинника. Така методика надає перевагу, зменшуючи падіння в'язкості розчину за рахунок стабілізації в'язкості розчину. Однак, спирт у якості розчинника змінює властивості розчину і не може бути використаний при приготування теплоакуючої рідини транспортування теплової енергії мобільним способом, оскільки є вибухо- і пожежонебезпечним.

Водорозчинні полімери миттєво змочуються у воді, однак відбувається часткове розчинення - частинки склеюються в агломерати і утворюють гелі [149-151,171]. Високошвидкісного перемішування розчинених полімерів слід уникати, щоб запобігти деградації полімеру від зсуву. Органічні розчинники - з огляду на їх нижчу полярність - сольватують (змочують) повільніше, ніж вода. Завдяки цьому при розчиненні полімерів в органічних розчинниках зазвичай не виникає проблеми агломерації та гелеутворення [149,171].

Для заводських чи лабораторних вимог існує три основні категорії методів:

- додавання безпосередньо у воду;
- попереднє диспергування у водорозчинній речовині, що не розчиняє полімер;
- використання механічних пристроїв, які забезпечують диспергування з мінімальним зсувом.

Вибір використовуваної методики залежить від кінцевої в'язкості та необхідного обсягу.

Переважає більшість методів попереднього диспергування водорозчинних полімерів відбувається в рідинах які не розчиняють ВРП, але змішуються з водою. Таке розчинення ВРП доцільно застосовувати для значних об'ємів розчинів у промислових масштабах. У виробничих умовах попереднє диспергування здійснюється у реакторі, потім безпосередньо в ємність додається необхідна кількість розчинника (води).

Також у виробництві застосовується додавання до розчинника солей і лугів, що знижує розчинність ВРП.

Однак, обидва методи не доцільно застосовувати для приготування теплоакумуючої рідини.

З експериментальних досліджень, можна зауважити, що важливо на початковому етапі розчинення полімерів у перші секунди, розділити (диспергувати) частинки сухої речовини ВРП [171].

Методика розчинення ВРП та технологічні параметри змішувального обладнання визначають однорідність отриманого розчину [171,172].

Важливою особливістю розчинення КМЦ є швидке намокання всіх частинок перед початком збільшення в'язкості. КМЦ за своєю природою є гідрофільною речовиною, тобто частинки КМЦ мають миттєво розчинятися при диспергуванні у воді. Обладнання, що використовується для перемішування, має бути ефективним для підтримки всього об'єму рідини в стані руху, щоб уникнути утворення грудок та згустків. Перемішувальний

пристрій має створювати потужний нижній потік у центрі змішувальної ємності і КМЦ необхідно засипати у вирву утворену пристроєм [171].

У випадку коли нагрівання може бути застосовано, рекомендовано нагрівати розчин КМЦ до 50-60 °С. Порошок дрібного розміру розчиняється значно швидше, в даному випадку забезпечується гідратація кожної окремої частинки і грудки не утворюються, однак на практиці відбувається інкапсуляція речовини [171]. Метилцелюлоза (МЦ) при розчиненні в лугах та деяких кислотах не потребує особливих умов, але для отримання водного розчину спочатку отримується високонцентрований розчин способом замочування порошку в гарячій воді (80-85 °С) для змочування всіх частинок, а потім додається холодна вода до утворення розчину необхідної концентрації.

В результаті аналізу літературних джерел [144-152] визначено, що технологічний процес розчинення водорозчинних полімерів потребує значних витрати електричної енергії та тривалий в часі. Запропонований спосіб інтенсифікації процесу змішування та зменшення споживання електричної енергії досягається шляхом використання підготовленої води та додаткового етапу перемішування розчину.

Мобільний технологічний комплекс передбачає на початковому етапі використання оригінального магнітного міксеру для проведення попередньої обробки води та якісного замішування ВРП, а наприкінці – модернізованого реактора-змішувача для додаткового перемішування розчину [171,172]. Основні засоби технологічного оснащення та елементи виробничої лінії ТК представлені на рисунку 4.3.1



Рис. 4.3.1. Основні засоби технологічного оснащення та елементи виробничої лінії технологічного комплексу.

Використання трьох етапів змішування дозволить мінімізувати витрати електроенергії за рахунок розділення режимів перемішування, застосування енергоефективного оснащення та економії часу розчинення водорозчинних полімерів у таблиця 4.8 представлено можливий вибір обладнання [171,172].

Перший етап розчинення - магнітний міксер, що передбачає дозоване попереднє замішування суміші порошків водорозчинних полімерів в активованій рідині.

Другий етап – турбінний змішувач, використовується для інтенсивного розмішування та перемішування двох і більше розчинів.

Третій етап – реактор-змішувач є додатковим способом перемішування розчину під час зберігання готового продукту та очікування його використання [171,172].

Таблиця 4.8. Основні прилади оснащення технологічного комплексу.

п.п.	Найменування	Енергоспожи- вання, кВт	Вартість, тис. грн
1	Міні АЗС на базі єврокубу 1000 л VSO 220B (VS1201-220), [173]	0,16	14,210
2	Дозатор ваговий FOYER FM-100 прямої дії з вібрацією, [174]	0,15	13,52
3	Магнітна мішалка з підігрівом (20 л,) типу ARGO-LAB M2-D Pro, [175]	0,53	23,52
4	Дозатор сипучих УТК-100, напівавтоматичний ваговий дозатор, [176]	0,3	14,88
5	Пересувний турбінний змішувач спеціального призначення 35 л, [177]	1,0	35,0
6	Реактор-змішувач типу РЗР-500 для в'язких продуктів, [178]	3,0	60,0
7	Поршневий дозатор для розливу рідин 10-5000 мл, [179]	0,5	30,0
Сумарне значення		5,64	90,0

Методика застосування мобільного технологічного комплексу:

1. Попередньо визначається співвідношення маси суміші водорозчинних полімерів та об'єму рідин. Для теплоакumuлюючої рідини співвідношення рідин вода/дефриз співвідносяться 70/30. Водорозчинні полімери додаються від 1 до 10% в залежності від необхідної густини і способу застосування теплоакumuлюючої рідини.

2. Задаються значення на контролери дозування суміші водорозчинних полімерів та суміші води і дефризу, встановлюється час проведення кожного з етапів перемішування:

2.1 Підготовка рідини з води і дефризу за допомогою магнітного міксеру.

2.2 Додавання суміші водорозчинних полімерів та попереднє перемішування.

2.3 Безпосереднє перемішування попереднього замішених розчинів турбінним змішувачем до повного розчинення протягом заданого часу.

2.4 Додаткове перемішування готового розчину до його використання або фасування.

Для адекватного використання МТК необхідно знати діапазон оптимальних концентрацій речовин, розрахувати оптимальний час та режими перемішування, попередньо визначити швидкість внесення компонентів та температурні характеристики ВРП, що вносяться. Вказані характеристики забезпечуються технічними характеристиками технологічного обладнання МТК [173-179].

Застосування мобільного технологічного комплексу дозволить забезпечити практичні результати для промисловості України:

1. Отримати і впровадити нові композиційні рідини у вигляді енергоефективних теплоносіїв або теплоакumuлюючих рідин для збереження енергії. Економічний ефект досягається шляхом скороченні часу на перемішування, в залежності від складу теплоакumuлюючої рідини.

Зменшуються витрати електричної енергії в межах від 15 до 65 % на виробництво 1 л готової продукції [171].

2. Застосування мобільного технологічного комплексу позитивно впливає на екологічну безпеку, оскільки не містить агресивних середовищ і немає викидів у оточуюче середовище.

3. Мобільний технологічний комплекс складається з уніфікованих вузлів і покупних виробів, що значно спрощується технологію виробництва і обслуговування обладнання. Зменшується вартість кінцевого продукту, забезпечується конкурентоздатність нової концепції приготування ВРП.

Використання у енергетичній промисловості результатів впровадження МТК надають можливість збільшення загальної ефективності і підвищення надійності, економію енергії та екологічну безпеку. На ринку з'являються нові теплоакумуючі матеріали, які не мають вітчизняних аналогів. Це стимулює впровадження ресурсозберігаючих технологій в теплоенергетиці України. Попередні розрахунки свідчать про швидку окупність капіталовкладень, (рентабельність від 20 % з терміном окупності в межах від 1,5 до 2 років [171]).

Висновки за розділом 4

1. В результаті огляду літературних джерел та аналізу ринку України було підібрано основні компоненти для створення низькотемпературної вибухо-і пожежобезпечної теплоакумуючої рідини транспортування якої не обмежується діючим законодавством. З огляду на зазначене, для досліджень відібрано водорозчинні полімери рослинного походження, які широко застосовуються в харчовій промисловості, а саме - гуарова і ксантанова камеді, карбоксиметилцелюлоза.

2. У якості розчинника для теплоакумуючої рідини використано воду та антифриз на основі речовини природнього походження бішофіту у

співвідношенні 70:30, що задовольняє технічним характеристикам теплоносія за температурам кипіння і замерзання.

3. Підібрано сучасні (відповідні) методики досліджень теплоакумуючої здатності методом T-history, питомої теплоємності, густини, водневого показника теплоакумуючої рідини. Створено необхідні експериментальні стенди. Точність і надійність результатів експериментальних досліджень зумовлена використанням сучасних вимірально-реєструючих приладів.

4. В результаті експериментальних досліджень методом T-history встановлено, що теплоакумуюча 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 термоцикування ця тенденція зберігається і становить 34,8%;

В результаті проведених комплексних експериментальних досліджень встановлено доцільність використання у складі теплоакумуючого матеріалу – воду, антифриз, ксантанову і гуарову камеді.

5. В результаті дослідження питомої теплоємності теплоакумуючої рідини у порівнянні з водою, ТАМ до термоцикування має меншу теплоємність у межах від 9,35 до 10,3 %.

Також встановлено, що відбувається поступове зниження теплоакумуючої здатності зразків створеної теплоакумуючої рідини. 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 тільки приготовленому теплоакумуючої рідини до термоцикування. Отже, строк

експлуатації теплоакumuлюючої рідини у теплових акумуляторах ємнісного типу об'ємом $1,5 \text{ м}^3$ не менше 2÷4 років.

6. В результаті проведених експериментальних досліджень водневого показника і густини встановлено, що при експлуатації теплоакumuлюючої рідини у діапазоні температур від 20 до 90°C в мобільному тепловому акумуляторі МТА-0,5МВт протягом чотирьох опалювальних сезонів:

- водневий показник залишається нейтральним;
- густина змінюється в межах 1–2%.

Встановлено, що досліджені показники не мають обмежуючого характеру при експлуатації мобільного теплового акумулятора МТА–0,5МВт немає. А теплоакumuлююча рідина не потребує заміни протягом, що найменше, 4 опалювальних сезонів. Це важливий економічний показник, з огляду на вартість теплоакumuлюючої рідини і складність робіт по його заміні в акумуляційних ємностях.

7. Запропоновано створення мобільного технологічного комплексу для приготування водорозчинних полімерів, дозволить отримати якісну теплоакumuлюючу рідину без додаткових енергетичних витрат в промислових масштабах.

РОЗДІЛ 5. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ДИНАМІКИ ФОРМУВАННЯ ПРОСТОРОВИХ НАНОСТРУКТУР

5.1. Математична модель

Математичний апарат, що використовувався при моделюванні приведено у Розділі 2 даної дисертації (2.3. Метод молекулярної динаміки і 2.4. Метод дисипативних часток). Проведено комп'ютерне моделювання процесів утворення структури в колоїдних системах теплоакumuлюючого матеріалу з застосуванням програм Scalable molecular dynamics NAMD та Visual Molecular Dynamics для візуалізації результатів [180,181]. Чисельне моделювання дозволяє отримати уявлення щодо утворення різних видів міцел і формування їх структур. Міцели представляють скупчення правильно розташованих молекул, асоціацій в агрегати молекул, які створюються переважно дисперсійними силами [182]. Отже, міцела – це структурна колоїдна одиниця.

При моделюванні утворення структур у колоїдів проблемою є різниця просторово-часових масштабів компонент досліджуваного середовища. Так до прикладу у водному розчині колоїдні частки мають розмір $1,0 \times 10^{-8}$ м (10нм), а молекула води має діаметр близький до $3,0 \times 10^{-10}$ метра (0,3нм) [108]. Очевидно, що різниця в просторових масштабах суттєва. Аналогічна проблема виникає і при урахуванні часових масштабів, оскільки є різниця у швидкості руху частинок колоїду і молекули води.

Вирішення цих проблемних питань можливе при застосуванні метод дисипативних часток DPD (п.2.4.), якщо зробити припущення і розглядати рідинне дисперсне середовище в колоїдних системах як ансамбль крапель рідини (soft particle), розміри яких близькі до розмірів колоїдних частинок. Таке припущення дозволяє вирішити проблему різниці масштабів системи зрівнявши їх, при цьому зберігається достовірність отриманих результатів.

Але метод DPD не враховує роботу сил притягання, які і зумовлюють самоорганізацію колоїдних структур.

Для врахування роботи сил притягання потрібно застосувати метод молекулярної динаміки MD, описаний у розділі 2, п.2.3. даної дисертації. 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. Однак, на основі методу MD представлені результати моделювання мезо- і навіть макромасштабних явищ [183]. Збільшення масштабів методу MD дозволило отримати адекватні результати розрахунку дисперсних потоків [184].

З урахуванням результатів викладених у [183,184], більш доцільно застосовувати метод MD для опису взаємодії між частинками рідини та колоїдними частинками. Такий підхід дозволяє врахувати при моделюванні сили притягання між рідиною й колоїдними частинками, а також розраховувати процеси самоорганізації міцел і їхніх агрегацій. Оскільки, обидві взаємодії частинок колоїд-колоїд і колоїд-рідина представлені одною формулою, є можливість оцінити степінь їх взаємодії шляхом змін глибини потенційної ями Леннарда-Джонса.

Отже, при комплексному застосуванні методів MD і DPD, що утворюють дворівневу математичну модель можна провести розрахунок взаємодії частинок рідина-рідина, колоїд-колоїд та колоїд-рідина.

У цій дворівневій моделі, сили взаємодії між частками рідина-рідина розраховуються методом DPD, оскільки саме він найбільш адекватно описує поведінку рідинного середовища розчинника. Метод MD дозволяє адекватно розрахувати взаємодію між частинками колоїд-колоїд і колоїд-рідина з урахуванням сил притягання які відповідають за процеси структуроутворення міцел та їх агрегацій.

5.2. Особливості реалізації дворівневої моделі

З урахуванням особливостей методів що застосовуються - молекулярної динаміки і дисипативних часток, дворівнева модель може бути представлена для $r_{ij} < r_c$ у вигляді [185]. Математичне моделювання проводиться у безрозмірній формі. Приведення вихідних даних до безрозмірного вигляду у таких масштабах:

- радіус відсікання r_c частинки колоїду прийнято за лінійний масштаб;
- масу частинки колоїду приймаємо за одиницю маси;
- час проходження частинкою колоїду відстані, що дорівнює її радіусу відсікання r_c прийнято якості масштабу часу [108].

Для того щоб параметри взаємодії часток колоїд-колоїд і колоїд-рідина мали близькі співрозмірні значення, необхідно перейти до безрозмірних величин. Для такого масштабування взаємодії колоїдних часток між собою та і з краплями рідини значення енергій обезрозмірено за значенням потенціалу Леннарда-Джонса. Вважається, що потенціал Леннарда-Джонса має максимальне значення сил притягання дорівнює абсолютному значенню консервативної сили при DPD-взаємодії.

Урахування масштабного фактору консервативних сил, що враховують стисненість рідини, обирають таким чином, щоб система рідких часток поводитися як рідина в мезомасштабному діапазоні. В даному випадку величина його обрана такою, щоб розглянута теплоакумуюча рідина мала стисненість води. Щільність часток вибрана такою, щоб кількість частинок у радіусі відсічення дорівнювала приблизно 20 [103,108].

$$F_{ij} = \begin{cases} \frac{24\varepsilon_{ij}}{r_{ij}} \left[\left(\frac{\sigma_{ij}}{r_{ij}} \right)^6 - 2 \left(\frac{\sigma_{ij}}{r_{ij}} \right)^{12} \right], & \text{для } i \text{ або } j \text{ середовище — колоїд} \\ \pi\omega_1(r_{ij}) - \gamma_{ij}m_i\omega_2(r_{ij})(\mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{e}_{ij}) + \delta_{ij}\theta_{ij}/\sqrt{\Delta t} \cdot \omega_1(r_{ij}) & \text{для } i \text{ або } j \text{ — рідина} \end{cases} \quad 5.2.1$$

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.

Визначаються за виразами

$$\omega_1(r_{ij}) = \frac{3}{\pi r_c^2 n} \left(1 - \frac{r_{ij}}{r_c}\right), \quad (5.2.2)$$

$$\omega_2(r_{ij}) = \frac{6}{\pi r_c^2 n} \left(1 - \frac{r_{ij}}{r_c}\right)^2, \quad (5.2.3)$$

де

$$\mathbf{v}_{ij} = \mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j. \quad (5.2.4)$$

Знайдемо одиничний вектор $\mathbf{e}_{ij}$, що направлений від j -ої частинки до i -ої

$$\mathbf{e}_{ij} = \frac{\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j}{r_{ij}}, \quad (5.2.5)$$

Де

$$r_{ij} = \sqrt{(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)^2}. \quad (5.2.6)$$

Для інтегрування системи рівнянь (5.2.1) застосовується комплексний підхід методів «leap-frog» та Adams-Bashforth [180]. Перший метод «leap-frog» дозволяє визначити положення частинок, другий Adams-Bashforth – визначити їх швидкість. При проведенні розрахунку припускається, що частинки колоїду рівномірно розташовані у розрахунковій області на початковий момент часу розрахунку. Також, в алгоритмі розрахунку проводиться уточнюючий перерахунок швидкості частинок кожні 10 часових кроків, це дає можливість врахувати вплив температури і термостабілізувати систему.

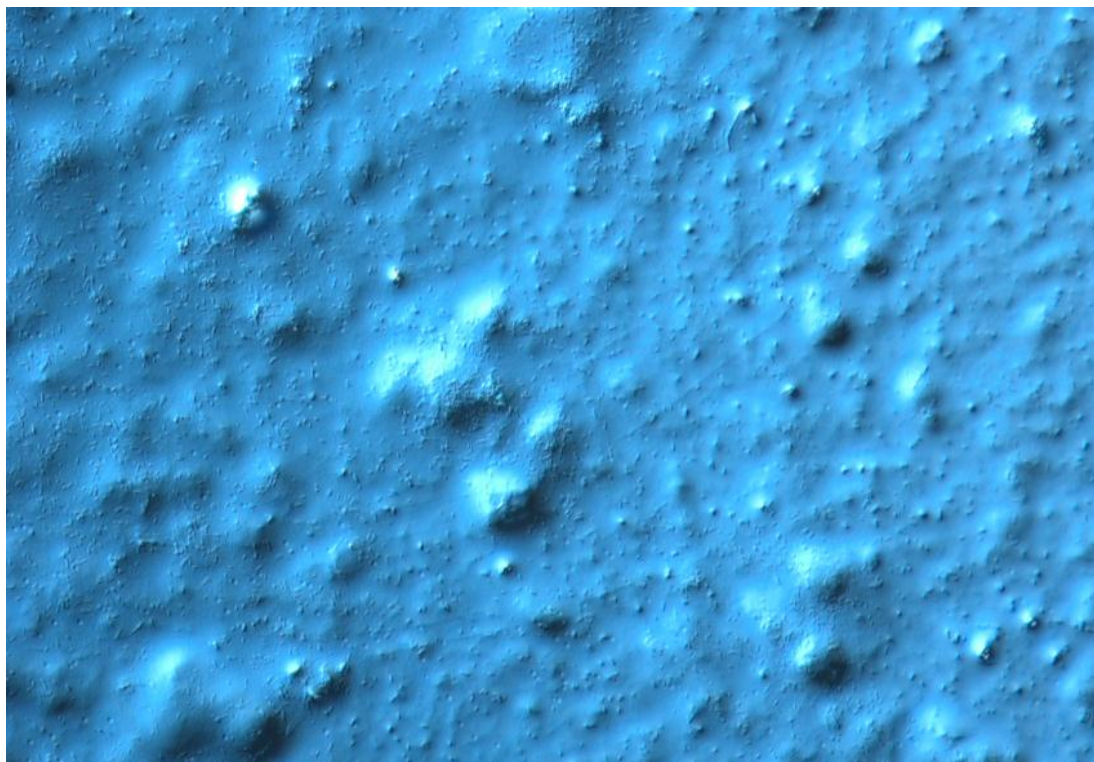


Рис.5.2.1 Фото ТАМ до термоцикування

Застосовуючи дворівневу математичну модель (5.2.1) проведено комплексні дослідження динаміки колоїдної системи. Колоїдну систему розглядали як вода (до 65%), антифриз до 25%, сухі речовини ксантанової камеді і карбоксолметилцелюлози до 10%.

Вода і антифриз позначено кульками блакитного кольору по типу взаємодії колоїди – коричневим кольором.

Розрахунки проводились у прямокутній області з урахуванням періодичних граничних умов, тобто частинка залишаючи розрахункову область через одну «границю», повертається в розрахункову область через протилежну «границю». При досягненні енергетичної рівноваги системи, тобто при досягненні мінімального значення вільної енергії системи розрахунок вважався завершеним.

5.3. Результати моделювання

Застосовуючи описану дворівневу математичну модель (5.2.1) було чисельно досліджено динамічні зміни у колоїдній системі. З урахуванням, що концентрація колоїдних часток становила близько 10 %. Розрахунки проведено для прямокутної області з періодичними граничними умовами, тобто частинка залишаючи розрахункову область через одну границю повертається в розрахункову область знову через протилежну границю.

Проведено моделювання кількох варіантів колоїдної системи, що відрізняються значеннями потенціалів взаємодії колоїдних часток між собою й із частками рідини. Розрахунки проводилися до моменту енергетичного врівноваження колоїдної системи, тобто до моменту, коли вільна енергія системи досягала мінімального значення.

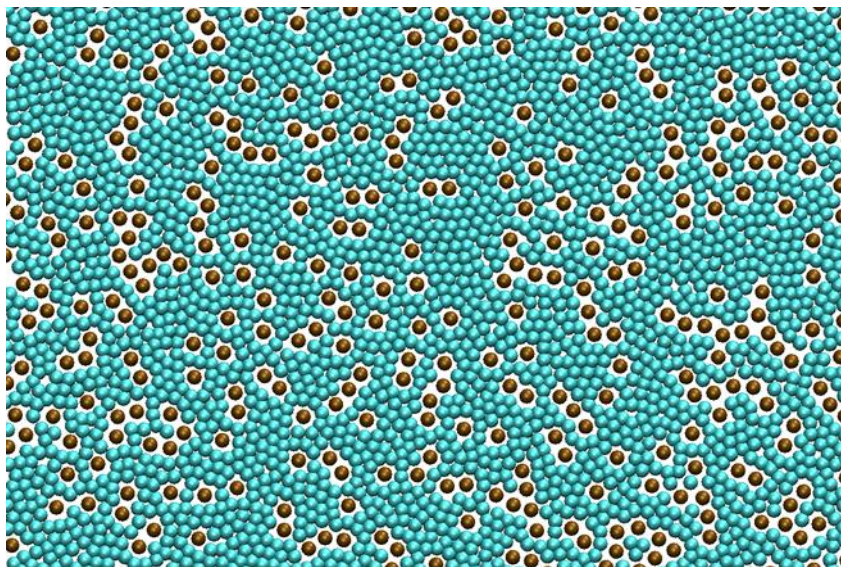


Рис. 5.2.2. Кулясті міцели, що утворюються з одиночних колоїдних часток сухої речовини ксантанової речовини і карбоксолметилцелюлози (коричневі), оточених частками рідини води і антифризу(пірузові).

На рисунку 5.2.2 представлено остаточну конфігурацію частинок при співвідношенні потенціалів взаємодії $\epsilon_{C-C}/\epsilon_{C-S}=1,5/1,3$. При таких значеннях потенціалів відбувається формування кулястих міцел. Це можна пояснити тим, що при більших за одиницю значеннях потенціалів взаємодії часток

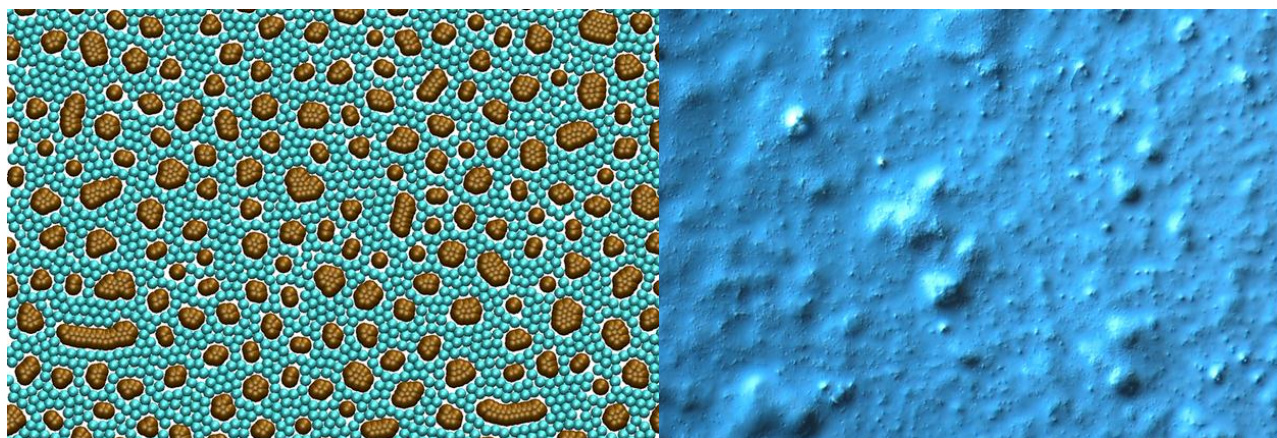
ϵ_{C-C} «колоїд-колоїд» починається взаємне відштовхування частинок. Значення потенціалів взаємодії часток ϵ_{C-S} «колоїд-розчинник» більше одиниці, відбувається їх взаємне відштовхування (гідрофільність частинок колоїду недостатня). В результаті, утворюються розрізнені кулясті міцели, що представляють собою одиночні гідрофільні колоїдні частки (коричневі), оточені частками рідини (пірузові), оскільки кількість розчинника у відсотковому співвідношенні переважає кількість сухих речовин.

Метод отримання теплоакумуючої рідини детально описано у Розділі 4, п. 4.4. Створення технології для приготування водорозчинних полімерів. Мобільний технологічний комплекс, а склад описано у [51,171,172].

Мікроструктура модельної системи (рис. 5.2.3б, 5.2.4.б і 5.2.4.г), що після обробки перебувала в статичних умовах до закінчення процесу структуроутворення, досліджена оптичним методом на мікроскопі Zeisse Axio Imager Z1, Додаток Г. На рис. 5.2.3а, 5.2.4.а і 5.2.4.в, представлена конфігурація часток, отримана в результаті чисельного моделювання. Видно, що експериментальна й розрахункова структури, що містять добре помітні глобулярні структури колоїдних часток, якісно досить добре корелюються. Така кореляція дозволяє зробити висновок про адекватність запропонованої моделі для аналізу процесів колоїдного структуроутворення.

На початковому етапі розчинення сухих речовин очевидно, відбувається формування глобулярних структур сухих речовин, рис. 5.2.3 а). Що пояснюється значними силами притягання між колоїдними частками і одночасно їх значною гідрофобністю (потенціали взаємодії $\epsilon_{C-C}/\epsilon_{C-S}=0,8/0,7$).

На проміжному етапі (під час циклів нагріву/охолодження теплоакумуючої рідини в ємності ТА) утворюються червоподібні міцели, рис. 5.2.4 а), які із часом (у «рівноважному» стані – при стабільних циклах нагріву/охолодження) трансформуються в розрізнені структури, рис. 5.2.4 в)

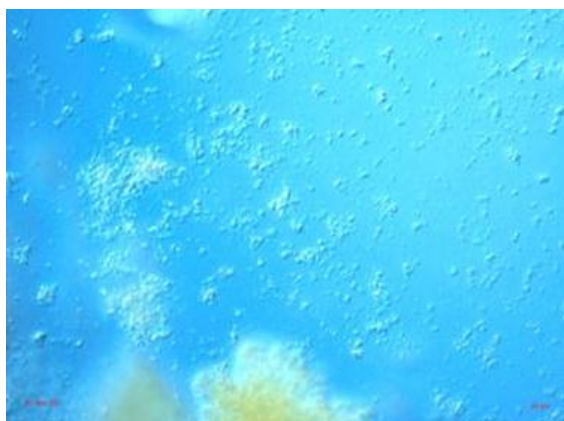
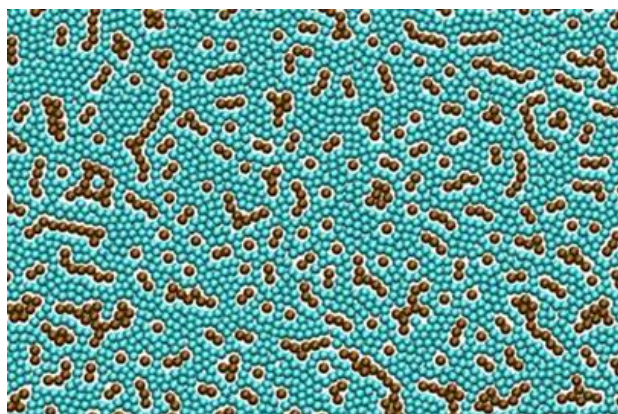


а)

б)

Рис. 5.2.3. Порівняння розрахункових результатів з зображеннями отриманими а допомогою мікроскопу $\epsilon_{C-C}/\epsilon_{C-S}=0,8/0,7$:

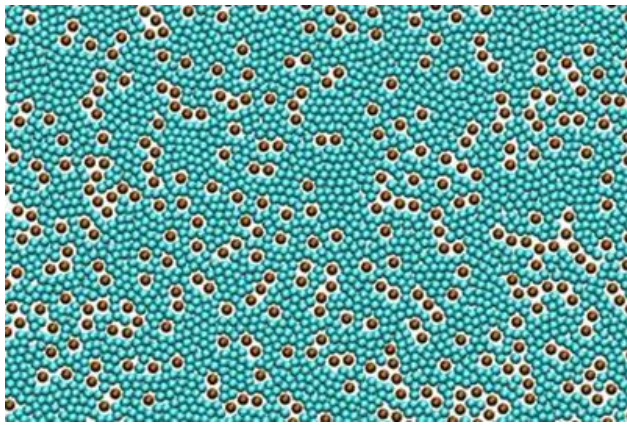
- глобулярні структури в системі теплоакумуючої рідини до її застосування а) розрахункова конфігурація, б) фото структури ТР (збільшення в $\times 40$ в полі DIC);



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

а)

б)



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

в)

г)

Рис 5.2.4. Порівняння розрахункових результатів з зображеннями отриманими а допомогою мікроскопу:

- паличкоподібні структури в системі теплоакумуючої рідини після 2-ох опалювальних сезонів
- а) розрахункова конфігурація, б) фото структури теплоакумуючої рідини (збільшення в x40 в полі DIC);
- розрізнені структури в системі ТАМ після його застосування протягом 4-ох опалювальних періодів в) розрахункова конфігурація, г) фото структури ТР (збільшення в x40 в полі DIC)

Досліджено інверсний варіант взаємодії системи $\epsilon_{C-C}/\epsilon_{C-S}$, рис. 5.2.4.а). Відношення потенціалів взаємодії $\epsilon_{C-C}/\epsilon_{C-S} < 1$, де переважають сили притягання між частками колоїду, а самі частки колоїду є недостатньо гідрофільними. На рис. 5.2.4 а) показана просторова конфігурація часток досліджуваної системи теплоакумуючої рідини для значень потенціалів $\epsilon_{C-C}/\epsilon_{C-S}=0,95/1,3$. В цьому випадку починають утворюватися паличкоподібні міцели, що складаються з ланцюжків колоїдних часток (коричневі), оточених частками рідини (пірюзові). Такі структури утворюються через перевагу сил притягання між частинками колоїду, що не змочуються або через агрегацію. Однак в подальшому, при потенціалі взаємодії $\epsilon_{C-C}/\epsilon_{C-S}=1,5/1,3$ рис. 5.2.4. в) відбувається розрізнення структур «колоїд-колоїд» внаслідок, що свідчить про позитивний вплив на однорідність консистенції теплоакумуючої рідини.

Висновки за розділом 5

1. В результаті проведеного моделювання досліджено співвідношення потенціалів систем «колоїд-колоїд»/ «колоїд-розчинник» з метою утворення результуючих структур. В результаті встановлено співвідношення потенціалів до структуроутворення часток сухих речовин теплоакумуючої рідини.

2. Результати досліджень експериментальної і розрахункової структур системи, що містять помітні глобулярні структури колоїдних часток, якісно досить добре корелюються, що свідчить про адекватність застосування даної моделі для акумуляційних рідин. Однак необхідно зауважити про складність пов'язану з низькою концентрацією сухих речовин відносно розчинника.

РОЗДІЛ 6.

ВИБІР І ЗАСТОСУВАННЯ В МАТЕРІАЛУ З ФАЗОВИМ ПЕРЕХОДОМ В ЄМНІСНИХ ТЕПЛОВИХ АКУМУЛЯТОРАХ

6.1. Вибір матеріалу з фазовим переходом для застосування в ємнісних акумуляторах мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт

При однофазній ємнісній акумуляції застосовується теплота фазового переходу I роду – це плавлення, кипіння, кристалізації, оскільки для II роду теплота фазового переходу рівна 0. Агрегатний стан матеріалів з фазовим переходом (PCM) змінюється протягом циклу експлуатації. З огляду на діапазон температур мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт розглядаємо фазовий перехід «плавлення/затвердіння». На сьогоднішній день матеріали цієї групи найбільш широко застосовуються для акумулювання. Це пояснюється їх екологічністю, економічною доцільністю і доступністю для застосування. Нижче проаналізовано і зведено переваги та недоліки, якими володіють тверді і рідкі ТАМ, які було враховано при розробці конструкції мобільного теплового акумулятора.

У розділі 1 даної дисертації, з огляду на температурний діапазон роботи створюваного мобільного теплового акумулятора було, обрано латентне зберігання теплової енергії. На рисунку 6.1.1. представлено залежності можливих способів зберігання теплової енергії (чутливого, латентного і термохімічного) в залежності від робочого температурного діапазону, також визначено речовини, що застосовуються в даному діапазоні.

На території України з огляду на відсутність законодавчої бази транспортування теплової енергії безтрубним способом і транспортування вибухо- і пожежонебезпечних речовин, можна використовувати чутливий або латентний спосіб зберігання теплової енергії. Однак акумуляційна здатність вище у другого способу до $0,85 \text{ ГДж/м}^3$, тому для реалізації в МТА-0,5МВт обрали – латентне зберігання теплової енергії.

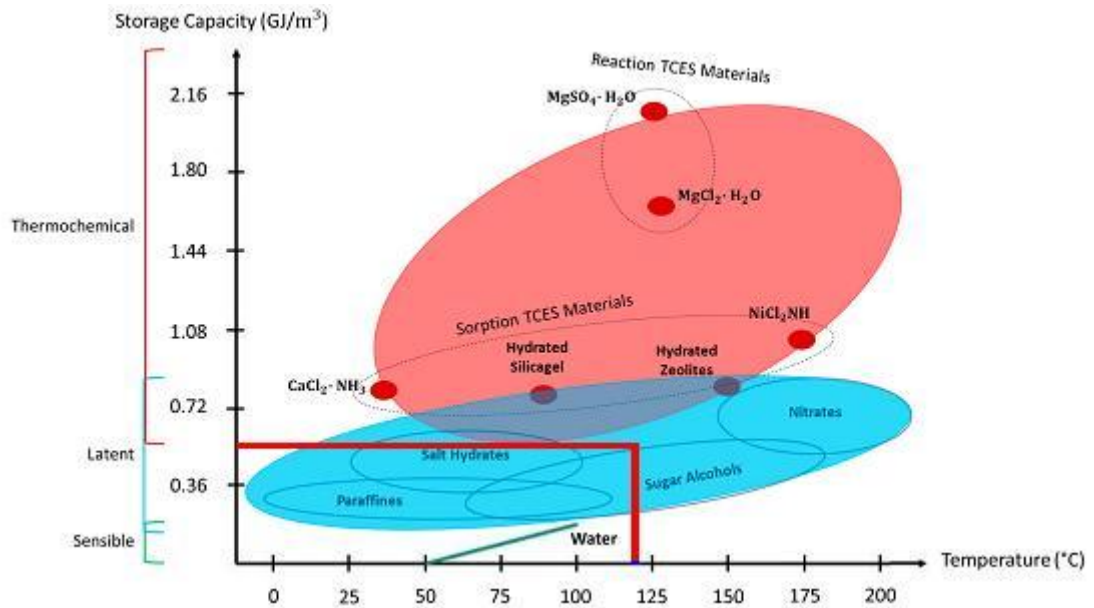


Рис. 6.1.1. Порівняння чутливого, латентного та термохімічного зберігання з точки зору діапазону температур та ємності зберігання [187,188].

Ранжування матеріалів з фазовим переходом представлено на рисунку 6.1.2, що відповідає законодавчій базі Європейського Союзу на 2024 р. Матеріали з фазовим переходом представлені на ринку Європейського Союзу і класифікуються як «Комерційно доступні продукти PCM» [189].

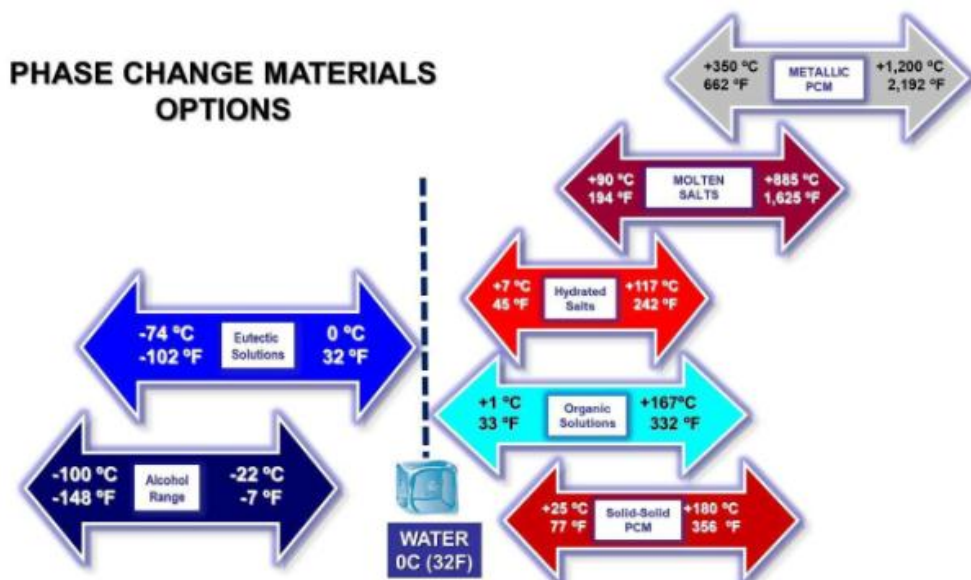


Рис. 6.1.2. Доступні для застосування матеріали з фазовим переходом [189-191].

Розглянемо матеріали з фазовим переходом, що застосовуються при латентному зберіганні теплової енергії [191,192].

1. Органічні сполуки. Парафіни. Діапазон температури фазового переходу знаходиться в межах $0...110^{\circ}\text{C}$ (зона 1, рис. 6.1.1.), що робить їх прийнятними для застосування в МТА для транспортування теплоти мобільним способом. Серед органічних речовин на сьогоднішній день застосовуються найчастіше, оскільки їм властива значна теплота фазового переходу, відсутність переохолодження, низький коефіцієнт в'язкості. Густина парафінів знаходиться в межах $907\text{--}915\text{ кг/м}^3$ при 15°C при температурі плавлення $40\text{--}60^{\circ}\text{C}$; з вмістом нафти до 13–14% і більше. Питома теплота плавлення парафіну ($\text{C}_{25}\text{H}_{52}$) $47,8\text{--}52,6$ (кал/г) або $200\text{--}220$ (кДж/кг) [193,194]. Парафіни не змішуються з водою і спиртом, мають низьку електропровідність, не киплять, екологічного безпечні, не токсичні, корозійностійкі та економічно доцільні [193,194]. Однак, при виборі парафінів необхідно звертати увагу, на те що вони мають низький коефіцієнт теплопровідності у твердій фазі, мають схильність до самозаймання за певних умов. Також негативним аспектом є – можлива деструкція в процесі життєвого циклу як наслідок зміна густини при фазовому переході [195]. Тому при виборі матеріалу з фазовим переходом для «теплого ядра» з лінійки парафінів таблиці 6.2., необхідно додатково проводити експериментальні дослідження [194-196]. Для подальших досліджень було відібрано церезин і петролатум.

Насичені жирні кислоти. Температура плавлення як у парафінів, зростає зі збільшенням довжини молекули, тому значення теплоти плавлення також близьке до значень парафінів, рис. 6.1.1. Жирні кислоти стабільні після багатократних циклів плавлення/затвердіння, оскільки є однокомпонентними речовинами, в них також відсутнє переохолодження і вони мають низьку теплопровідність. Однак, їх вартість втричі вища ніж у парафінів, що робить його менш доступним для застосування в тих об'ємах які застосовуються в ємнісних теплових акумуляторах [193,195,197].

Віск. Речовини природного походження мають діапазон температур плавлення від 55 до 100⁰С, мають не високу вартість. Для досліджень нами обрано озокерит, який є не дорогим і доступним. Він являє собою суміш твердих вуглеводнів з більшою або меншою домішкою рідких, газоподібних вуглеводнів, що входять до складу нафти. Його колір залежить від кількості смол, що містяться в ньому, має високу теплоємність і низьку теплопровідність [198,199]. Густина складає від 850 до 970 кг/м³ при температурі плавлення від 58 до 100⁰С. Доступним і економічно доцільним на ринку України є озокерит, хімічний склад якого включає: віск – 69...80%, парафін - 3...7%, нафтові смоли до 10%, асфальтени до 0,5...5 %, мінеральну оливу в межах 1...2 %, та механічні домішки в межах 3...8 % [193,195,200].

Цукрові спирти (гідрогенізовані форми вуглеводів). Ці матеріали мають більш високий діапазон температур фазових переходів рис. 6.1.2, а тому не можемо їх застосовувати в якості матеріалу з фазовим переходом для застосування в ємності мобільного теплового акумулятора. Необхідно відмітити, що порівняно, з іншими РСМ вони є новим видом матеріалів з фазовим переходом, а їх безумовна перевага полягає у безпечності [195].

Поліетиленгліколь (ПЕГ) представляє собою полімер етиленгліколю. Діапазон температур плавлення ПЕГ залежить фактично від його молекулярної маси і не досягає необхідних для нас значень, оскільки складає -10...+60⁰С.

2. Неорганічні сполуки включають: гідрати солей, солі металів, та метали. Діапазон температури фазового переходу знаходиться в межах 7...117⁰С, рис. 6.2 зона 2. Гідрати вирізняються високою теплопровідністю, у порівнянні, з органічними матеріалами, негорючі і економічного доцільніші за парафіни. Однак, їх застосування ускладнене через їх високу корозійну активність [195,201]. Крім цього, вони мають низьку термостійкість при великій кількості циклів експлуатації, сегрегацією фаз та переохолодження [195,202].

Кристалогідрати мають високі значення питомої теплоти плавлення,

однак проявляють нестабільність фізико-хімічних показників і на певних циклах плавлення незворотно розкладаються на воду, сіль та кристалогідрат з меншим вмістом води. Тобто, спостерігається розділення фаз і поступова зміна хімічного складу. В результаті теплота, що виділяється при розрядці теплового акумулятора менше очікуваної. Через це кристалогідрати мають обмежений ресурс роботи виконуючи менше циклів заряду/розряду акумуляуючого обладнання. Діапазон температур фазових переходів складає 40...90°C, [195,202].

Для досліджень було обрано тригідрат ацетату натрію. В результаті проведених досліджень Розділ 4, п.4.2 (Досліди №3, №4, №5) даної дисертації, в наслідок виділення CO₂ і бурхливості протікання процесу, їх вирішено не застосовувати у теплоакулюючих ємностях мобільного теплового акумулятору.

3. Евтектичні суміші - це композиції органічних і неорганічних сполук, у яких температура точки плавлення менше ніж у будь якої з речовин, що входить до її складу [195,203]. Склад евтектичної суміш можливо підбирати залежно від необхідної температури плавлення. На сьогоднішній день літературні дані щодо досліджень теплофізичних властивостей обмежені. Евтектичні суміші при адекватному виборі компонент вирізняються високою густиною енергії, відсутністю розшарування та конгруентним фазовим переходом [203,204]. Однак, їх використання обмежене на сьогоднішній день через високу вартість і відсутність досліджень властивостей.

В таблиці 6.1. представлено недоліки та переваги теплових акумуляторів, які працюють з застосуванням матеріалів з фазовим переходом.

Проаналізувавши властивості теплоакулюючих матеріалів з фазовим переходом та температурні діапазони фазових переходів рис. 6.1.1. та рис. 6.1.1. рекомендується для «теплового ядра» МТА органічні сполуки - парафіни і воски.

Таблиця 6.1. Вибір матеріалу з фазовим переходом I роду

Речовина	Температура плавлення, °C	Питома теплоємність, кДж·кг ⁻¹ ·K ⁻¹	Теплота плавлення, кДж·кг ⁻¹	Густина, кг/м ³	Вартість грн/кг (2022рік)
Не органічні					
Кристалогідрати					
Магній азотнокислий	95	-	160,1	1500	24-64
Алюміній азотнокислий	70	-	155,03	-	від 140
Гідроксид барію	78	-	301	2180	від 30
Солегідрати					
Тригідрат ацетату натрію	58	2,79	272,4	1450	від 40
Бішофіт MgCl ₂ · 6H ₂ O	-20	3,2	165,169	1450	від 16
Органічні					
Парафін					
Петролатум	65				від 37
Парафін марки T1	52...58	-	-	-	від 50
Парафін гранульований марки PW4	57	-	-	-	від 41
Парафін гранульований марки PWNS	50,6	-	-	-	від 41
Парафін нафтовий твердий	49...53,3	-	-	-	від 48,6
Парафін харчовий марки P2	54...60	-	-	-	Від 67
Церезин M75	65...88				від 68
Віск					
Віск пальмовий	55...60	-	-	-	48,50
Карнаубський віск	62,9...72,0		115,3	-	200
Віск ПВ200				-	78
Буровугільний віск	73,9...89,0		138,8	-	120
Озокерит	56,5...100	2,1	140,6	950	255

В результаті огляду даних літературних джерел [193-204] було обрано для подальших досліджень зразки – озокериту, рис. 6.1.3; церезину, рис. 6.1.4. та петролатуму, рис. 6.1.5.



Рис. 6.1.3 Озокерит

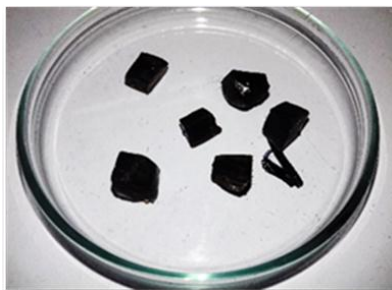


Рис. 6.1.4. Церезин



Рис.6.1.5. Петролатум

Подальші дослідження матеріалів з фазовим переходом необхідно досліджувати з огляду на світовий досвід застосування [53-57] з урахуванням переваг і недоліків, та можливість невілювати недоліки такого акумуляційного обладнання, таблиця 6.2.

Таблиця 6.2. Переваги і недоліки теплових акумуляторів з застосуванням РСМ.

Переваги	Недоліки
Висока щільність запасаної енергії	Деякі РСМ токсичні та мають здатність
Висока санітарно-гігієнічна ефективність	Складність конструкції
Надійність системи теплозабезпечення	Висока вартість
Достатньо висока прихована теплота фазового переходу	Вузький температурний діапазон зарядки і розрядки
Малогабаритність конструкції	Корозійна активність (гідрати солей)
Екологічна і економічна доцільність	Деградація у часі мікроструктури РСМ

6.2. Дослідження теплофізичних властивостей матеріалів з фазовим переходом

Дослідження теплоємності матеріалів з фазовим переходом проводились у Лабораторії теплометрії ІТТФ НАН України з використанням диференціального мікрокалориметра ДМКИ-1, основні технічні характеристики і фото приладу наведені в таблиці 4.4. та рисунку 4.1.9 Розділу 4, п.4.1.2 даної дисертації.

Для отримання даних про теплоємність проведено цикл з трьох досліджень для кожного матеріалу (петролатуму церезину, озокериту) за однакових умов проведення експерименту. Отримані дані для кожного матеріалу представлені як середнє значення теплоємності матеріалу в температурному діапазоні від 30 °С до 105 °С, маси досліджуваних зразків представлено у таблиці 6.3.

Таблиця 6.3. Результати вимірювань ваги матеріалів з фазовим переходом.

№ зразка	Речовина	№ досліду	Маса, г
1	Петролатум	1	2,915
		4	0,995
		5	0,997
2	Церезин	2	1,092
		6	1,025
		7	0,987
3	Озокерит	3	1,101
		8	0,923
		9	0,950

Результати вимірювань питомої теплоємності зразків в діапазоні температури від 30 °С до 105 °С наведені на рис. 6.2.1 - 6.2.3 та в зведеній таблиці 6.4, рис 6.2.4

1	Зразок №1 Петролатум				
2	T, °C	C, Дж/кг·К (дослід №1)	C, Дж/кг·К (дослід №4)	C, Дж/кг·К (дослід №5)	C, Дж/кг·К (середнє значення)
3	32,50	3440,86	3412,85	3334,24	3395,98
4	37,50	3627,03	3479,48	3545,40	3550,63
5	42,50	3749,95	3594,44	3502,70	3615,70
6	47,50	3888,90	3619,01	3694,03	3733,98
7	52,50	3848,30	3661,34	3561,99	3690,54
8	57,50	3647,08	3567,37	3367,75	3527,40
9	62,50	3246,49	3181,33	3089,13	3172,32
10	67,50	2645,24	2533,84	2522,24	2567,11
11	72,50	2352,30	2182,00	2083,14	2205,81
12	77,50	2178,72	1880,20	2030,96	2029,96
13	82,50	2213,17	2050,64	1776,65	2013,49
14	87,50	2276,12	2258,62	1941,42	2158,72
15	92,50	2245,70	2001,28	1903,23	2050,07
16	97,50	2310,89	1903,55	2051,65	2088,70
17	102,50	2283,63	1842,68	2047,93	2058,08

Рис. 6.2.1. Залежність питомої теплоємності від зміни температури зразків петролатуму [111].

23	Зразок №2 Церезин				
24	T, °C	C, Дж/кг·К (дослід №2)	C, Дж/кг·К (дослід №6)	C, Дж/кг·К (дослід №7)	C, Дж/кг·К (середнє значення)
26	32,50	2765,29	2941,00	2758,01	2821,43
27	37,50	3639,87	3617,73	3377,37	3544,99
28	42,50	4264,51	4420,96	4006,87	4230,78
29	47,50	4918,24	4858,30	4571,49	4782,68
30	52,50	5008,85	4988,50	4618,82	4872,06
31	57,50	4635,90	4431,56	4258,67	4442,04
32	62,50	4136,80	4047,83	3875,72	4020,12
33	67,50	3959,50	4008,27	3905,50	3957,76
34	72,50	3926,99	4063,40	3940,96	3977,12
35	77,50	3345,53	3454,60	3274,55	3358,23
36	82,50	2644,75	2523,19	2552,26	2573,40
37	87,50	2271,48	2195,04	2108,63	2191,72
38	92,50	1972,76	2054,98	1962,87	1996,87
39	97,50	2157,16	2162,91	1883,25	2067,77
40	102,50	2013,52	1759,42	1789,17	1854,04

Рис. 6.2.2. Залежність питомої теплоємності від зміни температури зразків церезину [111].

46					
47	Зразок №3 Озокерит				
48	Т, °С	С, Дж/кг·К (дослід №3)	С, Дж/кг·К (дослід №8)	С, Дж/кг·К (дослід №9)	С, Дж/кг·К (середнє значення)
49	32,50	3444,31	3147,65	3227,96	3273,31
50	37,50	3810,25	3681,42	3740,63	3744,10
51	42,50	4606,69	4475,52	4515,52	4532,57
52	47,50	5436,09	5543,39	5305,72	5428,40
53	52,50	6772,08	6240,46	6300,91	6437,82
54	57,50	4007,58	3662,01	3606,75	3758,78
55	62,50	2382,95	2402,87	2023,45	2269,75
56	67,50	2263,00	2253,64	2046,56	2187,73
57	72,50	2149,99	2230,71	2028,44	2136,38
58	77,50	2162,27	2080,79	2031,33	2091,46
59	82,50	2295,82	2031,47	1979,23	2102,17
60	87,50	2082,91	2030,20	1832,80	1981,97
61	92,50	2074,79	1894,52	2076,62	2015,31
62	97,50	2096,34	2041,34	1972,19	2036,62
63	102,50	2034,80	1879,20	1822,40	1912,13

Рис. 6.2.3. Залежність питомої теплоємності від зміни температури зразків озокеритк [111].

Таблиця 6.4. Результати вимірювань питомої теплоємності, усереднені значення

Т, °С	Питома теплоємність зразка за результатами трьох досліджень, Дж/кг·К		
	Петролатум	Церезин	Озокерит
32,5	3395,98	2821,43	3273,31
37,5	3550,63	3544,99	3744,10
42,5	3615,70	4230,78	4532,57
47,5	3733,98	4782,68	5428,40
52,5	3690,54	4872,06	6437,82
57,5	3527,40	4442,04	3758,78
62,5	3172,32	4020,12	2269,75
67,5	2567,11	3957,76	2187,73
72,5	2205,81	3977,12	2136,38
77,5	2029,96	3358,23	2091,46
82,5	2013,49	2573,40	2102,17
87,5	2158,72	2191,72	1981,97
92,5	2050,07	1996,87	2015,31
97,5	2088,70	2067,77	2036,62
102,5	2058,08	1854,04	1912,13

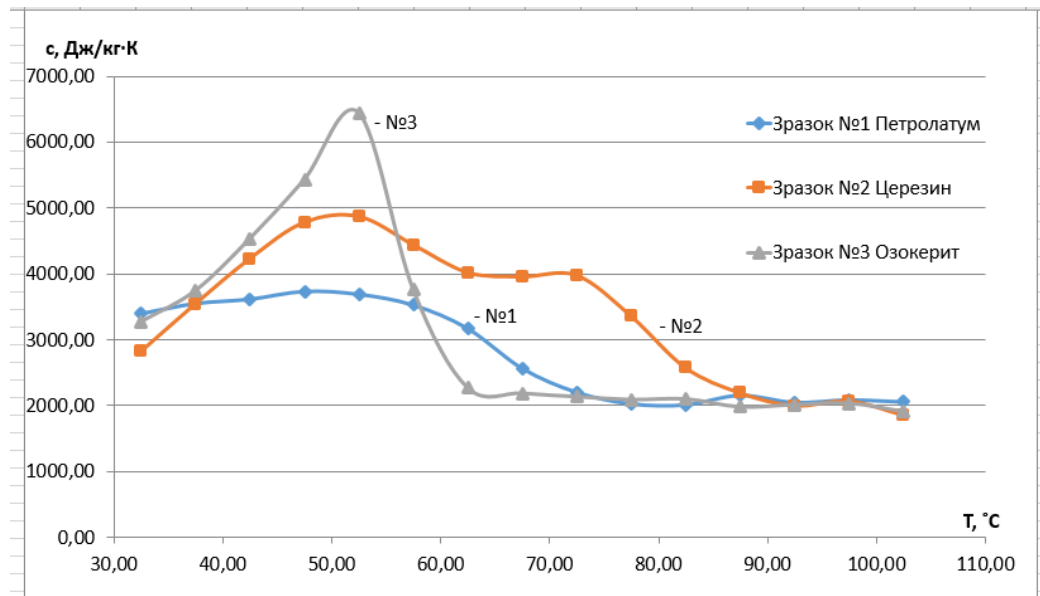


Рис. 6.2.4. Залежність питомої теплоємності РСМ в залежності від зміни температури [111].

Аналізуючи отримані експериментальні результати зміни теплоємності в залежності від зміни температури в процесі нагріву зразків матеріалів з фазовим переходом, обираємо зразок церезину, оскільки в робочому діапазоні температур МТА від 30 до 90 °С він має складний пік, що потенційно дозволяє отримати вищу акумуляційну здатність.

Оскільки, обраний зразок церезину буде розташований в «тепловому ядрі» акумуляційних ємностей необхідно провести його термоцикування методом T-history. Методика проведення даного дослідження представлена в п.4.1.2., сам зразок розташований у ємності 2, рис. 4.1.6. Отримані результати питомої теплоємності церезину до і після 85 циклів термоцикування представлено на рис. 6.2.5.

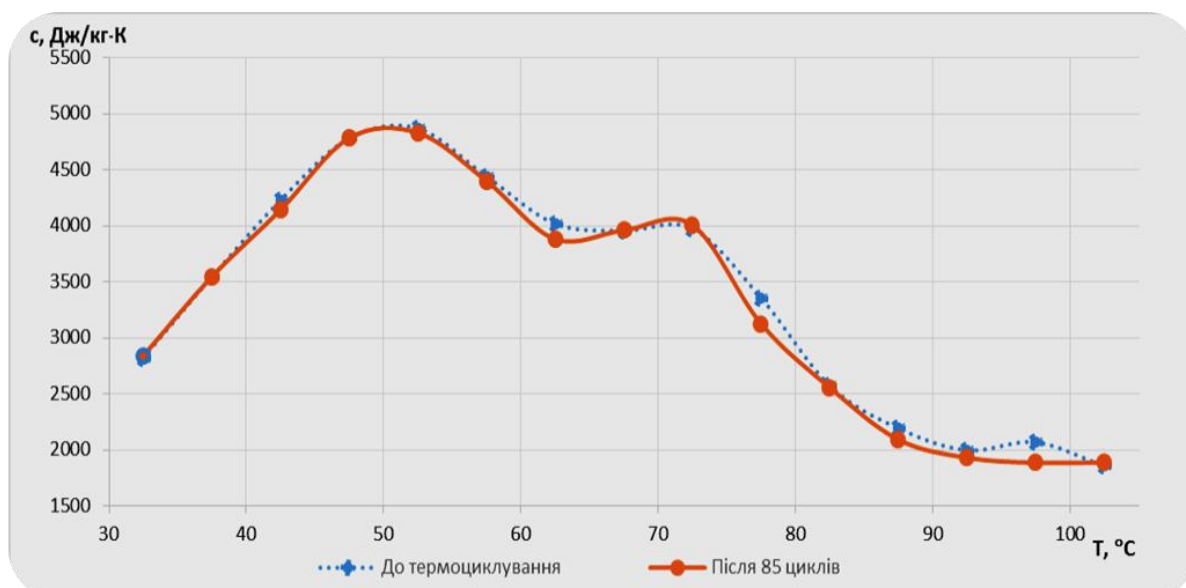


Рис. 6.2.5. Графік залежності питомої теплоємності від зміни температури церезину до термоцикування та після [110].

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, що виникає по висоті теплоакумуючої ємності.

6.3. Дослідження теплоакумуляційної здатності матеріалу з фазовим переходом при термоцикуванні

Для визначення теплоти фазового переходу кожного з зразків було проведено за допомогою графічно-аналітичного методу відповідні розрахунки. Так за допомогою програми Excel за даними з табл. 6.2.1 було проведено лінії тренду за трьома точками і визначено площу теплоти фазового переходу і прораховано площі, які і відповідають теплоті фазового переходу для кожного з зразків, рис. 6.3.1 - рис. 6.3.3.

Маючи графік залежності питомої теплоємності матеріалу $c(T)$ з фазовим переходом від температури можна оцінити величину теплоти фазового переходу.

При фазовому переході (плавленні) надлишкова теплота, яку поглинає зразок, йде не на підвищення температури, а витрачається на перебудову структури матеріалу (руйнування кристалічної решітки, зміна агрегатного стану тощо) та відобразатиметься на графіку питомої теплоємності як надлишкова теплоємність $\Delta c_{\text{НАДЛ}}(T)$ у вигляді «піку» для екзотермічних реакцій та «провалу» для ендотермічних. Теплота фазового переходу $Q_{\text{ФАЗ}}$ може бути обчислена як площа під «піком» на графіку теплоємності, що виходить за межі «фонового» рівня теплоємності. Фоновий рівень теплоємності $c_{\text{ФОН}}(T)$, в свою чергу, визначається методом інтерполяції за значеннями температури початку та кінця «піку» на графіку.

Надлишкова теплоємність визначається за формулою:

$$\Delta c_{\text{НАДЛ}}(T) = c(T) - c_{\text{ФОН}}(T) \quad (6.3.1.)$$

Теплота фазового переходу обчислюється шляхом інтегрування надлишкової теплоємності по температурі за формулою:

$$Q_{\text{ФАЗ}} = \int_{T_1}^{T_2} \Delta c_{\text{НАДЛ}}(T) dT \quad (6.3.2.)$$

де T_1 , T_2 - значення температури початку та кінця фазового переходу на графіку залежності теплоємності від температури, на рис. 6.31. – 6.3.3. позначена червоними лініями.

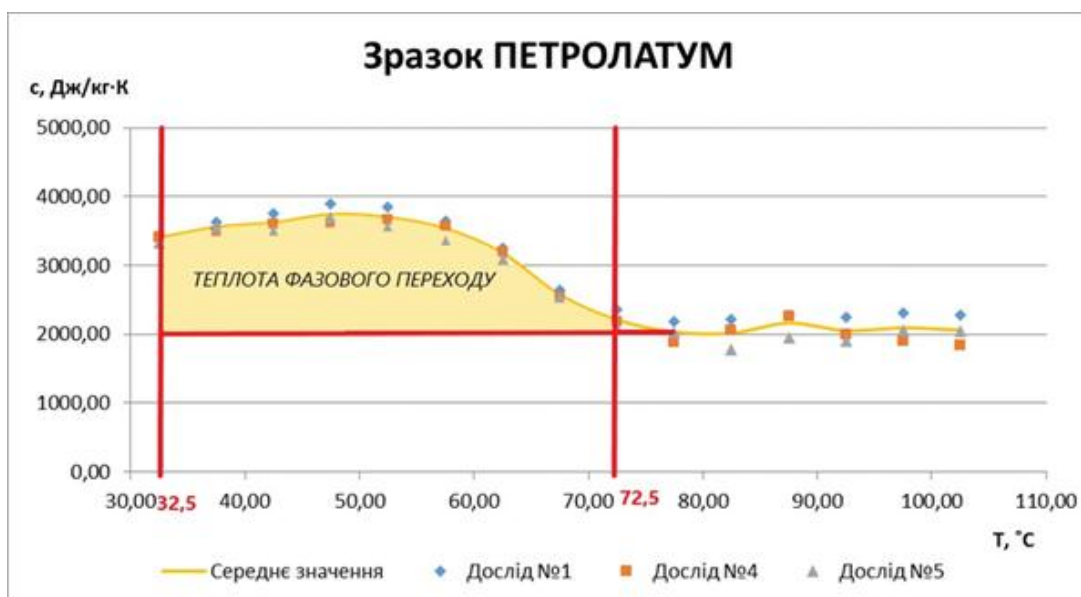


Рис. 6.3.1. Теплота фазового переходу зразка петролатуму 560,0 кДж/кг

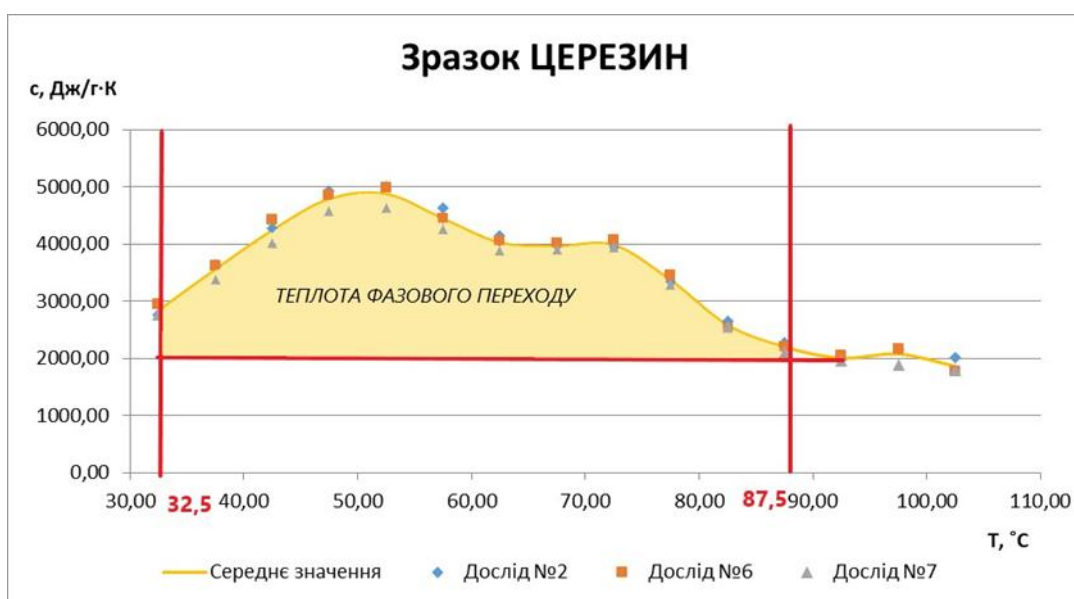


Рис. 6.3.2. Теплота фазового переходу зразка церезину 1157,12 кДж/кг

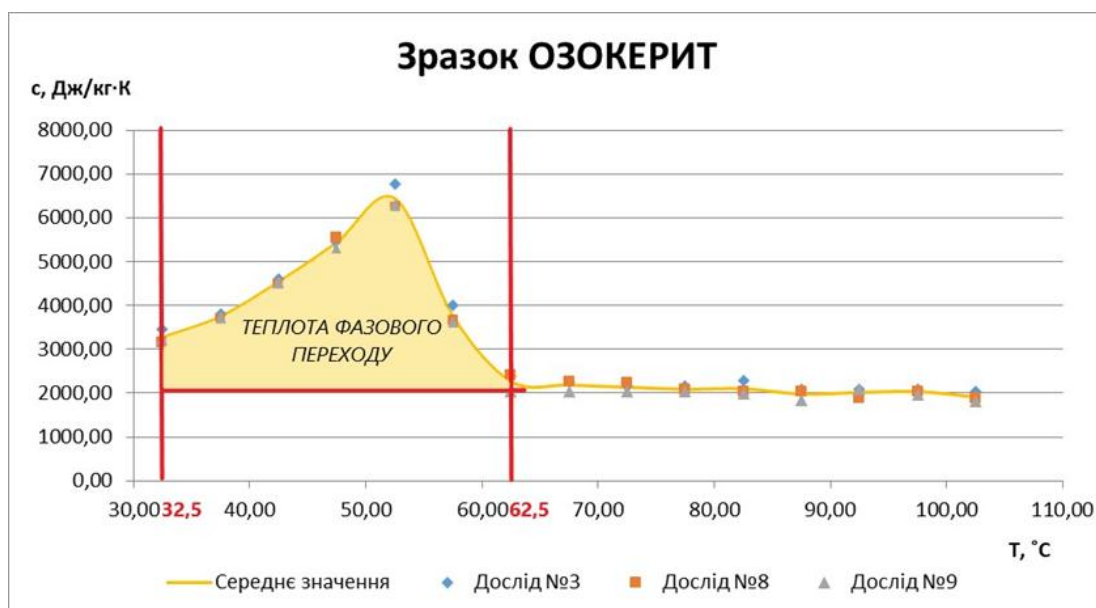


Рис. 6.3.3. Теплота фазового переходу зразка озокериту 728,24 кДж/кг

Оскільки 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.

За методикою представленою в Розділі 4, п.4.1.2. (Дослідження акумулюючої здатності теплоакumuлюючої рідини і матеріалів з фазовим переходом в об'ємі ємності) даної дисертації проведено експериментальні дослідження з визначення зміни маси матеріалу з фазовим переходом при багаторазовому термоциклуванні. Результати досліджень наведено на рис. 6.3.4.

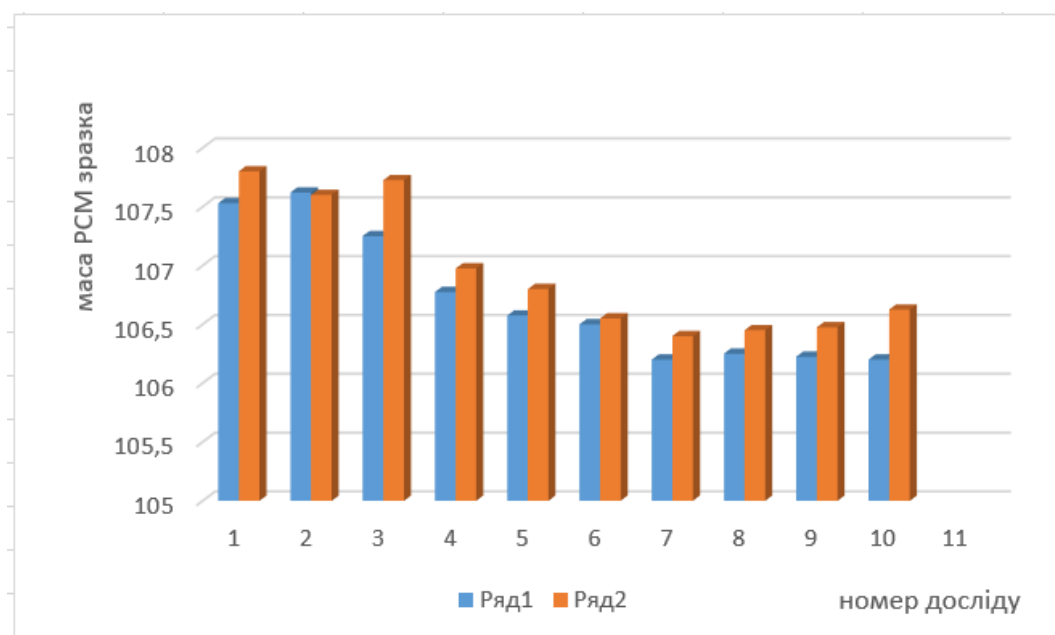


Рис. 6.3.4. Динаміка зміни ваги PCM матеріалу при термоциклуванні: ряд 1 - початкова маса церезину; ряд 2- кінцева маса церезину (після термоциклування) [48].

Зразок PCM, в даному випадку церезин вибір якого обґрунтовано у п.5., був заповнений у ємність 2 і не змінювався протягом усього циклу експериментів від Досліді №1 до Досліді №10. Вимірювання маси проводили до термоциклування і після. Зважування проводили на електронних вагах Ohaus AX224 (220г/0,1мг) з автоматичною колібровкою (США). Початкова маса перед Дослідом №1 становила 107,53 гр після останнього експерименту Досліді №10, маса дорівнювала 106,2 гр. Це означає, що в процесі 40 циклів термоциклувань (нагрів-охолодження) маса змінилась в межах $1 \div 2$ % і даний матеріал можливо використано для заповнення «теплового ядра» МТА-0,5МВт. Такі незначні зміни маси, а також відсутність об'ємного розширення, що спостерігалась у процесі досліджень свідчать про безпечність і надійність даного PCM [48].

Висновки за розділом 6

1. В результаті аналізу теплофізичних, хімічних та експлуатаційних властивостей матеріалів з фазовим переходом, викладених у літературних джерелах і нормативних документах що регламентують застосування РСМ у мобільних теплових акумуляторах, з урахуванням обмеженого діапазону транспортування речовин на території України, для досліджень було обрано парафіни – петролатум і церезин та віск – озокерит.

2. Дослідження питомої теплоємності зразків матеріалів з фазовим переходом в залежності від зміни температури у діапазоні від 30 до 90°C свідчать про доцільність застосування речовин – церезину і озокериту. Оскільки, у зразків петролатуму пік значення питомої теплоємності має максимальне значення 3690,54 Дж/кг·К, а середнє значення в межах 2010...3300 Дж/кг·К. У церезину та озокериту ці значення піків - 4872,06 та 6437,82 Дж/кг·К, а середнє значення питомої теплоємності варіюється в межах 3350...4600 та 3100...4400 Дж/кг·К, відповідно.

3. В результаті аналітичного дослідження акумуляційної здатності досліджуваних матеріалів з фазовим переходом з урахуванням характеру протікання процесів плавлення/затвердіння для застосування в «тепловому ядрі» теплоакумуюючих ємностей мобільного теплового акумулятору обрано церезин, оскільки він має складний пік фазового переходу в найширшому діапазоні температур від 32,5 до 87,5, що зумовлює найвищу теплоту фазового переходу до 1157,12 кДж/кг.

4. Аналіз отриманих результатів теплоти фазового переходу матеріалів з фазовим переходом (петролатум 560,0 кДж/кг, церезин 1157,12 кДж/кг і 728,24 кДж/кг) і діапазону температури в якому він відбувається дозволяє зробити висновок про доцільність застосування церезину у «тепловому ядрі» мобільного теплового акумулятора.

5. В результаті експериментальних досліджень методом T-history встановлено, що матеріал з фазовим переходом церезин при тривалому

термоциклуванні до 40 циклів, що заповнює «теплове ядро» в конструкції M-TES, відбуваються зміни в масі РСМ до 2%, що свідчить про безпечність і надійність його використання.

РОЗДІЛ 7. ДОСЛІДЖЕННЯ АКУМУЛЯЦІЇ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ СТВОРЕНОГО ДОСЛІДНОГО ЗРАЗКА МОБІЛЬНОГО ТЕПЛОВОГО АКУМУЛЯТОРА. ДИСКРЕТНА СИСТЕМА ОПАЛЕННЯ

7.1. Секція акумуляції. Оптимізація конструкції теплового акумулятора ємнісного типу

7.1.1. Визначення основних параметрів ємності аккумулятора

Для розробки універсальної оптимізованої конструкції теплового аккумулятора (ТА), що може бути використана в різних системах тепlopостачання, в тому числі і акумуляційній секції мобільного теплового аккумулятора МТА-0,5МВт, було проведено технологічні і конструктивні розрахунки.

Найбільш точним вважається розрахунок проведений за ентальпією на основі якого визначається швидкість розряду ТА, підбираються ємності необхідного розміру, їх кількість та основні конструктивні параметри. При проведенні розрахунку враховано, що в трубному просторі знаходиться теплоносіє (вода), а у міжтрубному просторі ємності – теплоакумуюча рідина на основі водорозчинних полімерів. Необхідна кількість енергії (теплоти) для зарядки ТА визначається за формулою [109]

$$Q = cm(t_k - t_n) = cV\rho\Delta t, \quad (7.1.1.)$$

де c – питома теплоємність теплоносія, кДж /кг·°С; V – об'єм теплоносія, м³; ρ – густина теплоносія кг/м³; t_k, t_n – кінцева і початкова температура теплоносія, °С.

Орієнтовний час розрядки ТА

$$\tau = Q/q_{\text{втр}}, \quad (7.1.2)$$

де, $q_{\text{втр}}$ – теплові втрати.

Робочу температуру визначали за формулою

$$t_p = (t_k + t_n)/2 = 70\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (7.1.3)$$

Визначаємо теплофізичні характеристики води і теплоакumuлюючої рідини при робочій температурі створюваного мобільного теплового акумулятора [109]

$$c_{\text{H}_2\text{O}} = 4187 \text{ Дж/кг} \cdot \text{K}, \quad g_{\text{H}_2\text{O}} = 977,8 \text{ кг/м}^3 \text{ при } 70\text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$c_{\text{TP}} = 3960 \text{ Дж/кг} \cdot \text{K}, \quad g_{\text{p}_2} = 1,16 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 \text{ при } 100^{\circ}\text{C}.$$

Приведено розрахунок для ємності типових об'ємів ТА 500, 1000, 1500 та 2000л, що представлені на ринку України. Дані з проведених розрахунків наведено в таблиці 7.1. Так, для ємності 1500л, [109]

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = g_{\text{H}_2\text{O}} V = 977,8 \cdot 1500 = 1466,7 \text{ кг},$$

$$Q_{\text{H}_2\text{O}} = 4187 \cdot 1466,7 \cdot 40 = 245,64 \text{ МДж},$$

$$q_{\text{H}_2\text{O}} = Q/3600 = 245,64 \cdot 10^6 / 3600 = 68,23 \text{ кВт/год},$$

$$m_{\text{TP}} = g_{\text{p}_2} V = 1160 \cdot 1500 = 1740,0 \text{ кг},$$

$$Q_{\text{TP}} = 3960 \cdot 1740,0 \cdot 40 = 275,62 \text{ МДж},$$

$$q_{\text{TP}} = Q/3600 = 275,62 \cdot 10^6 / 3600 = 76,560 \text{ кВт/год}.$$

Для забезпечення теплової потужності МТА в 0,5 МВт при зазначених теплоносіях необхідно 8 теплоакumuлюючих ємностей об'ємом 1500л, [109]

$$8 \cdot 68,23 \text{ кВт} = 0,546 \text{ МВт} - \text{для води},$$

$$8 \cdot 75,56 \text{ кВт} = 0,613 \text{ МВт} - \text{для теплоакumuлюючої рідини}.$$

В систему індивідуального теплового пункту створюваного МТА встановлено пластинчастий теплообмінний апарат потужністю 100кВт, що обмежує час розрядки (при 90/50 $^{\circ}\text{C}$ це температурний графік роботи МТА)

[109]. Тому розрахунок часу розрядки визначаємо з урахуванням теплообмінного апарата, год

$$\tau_{H_2O} = 546 \text{ МВт} / 100 \text{ кВт} = 5,46 \text{ для води орієнтовний час розрядки}$$

становить 5 год 28 хв;

$$\tau_{ТАМ} = 613 \text{ МВт} / 100 \text{ кВт} = 6,13 \text{ для ТР орієнтовний час розрядки}$$

становить 6 год 8 хв.

Аналогічні розрахунки проведено для об'ємів 500, 1000 та 2000л результати розрахунків зведено в таблиці 7.1.

Таблиця 7.1. Розрахункові параметри ємностей теплового акумулятору [109].

Об'єм ємності, л	500	1000	1500	2000
Маса m_{H_2O} , кг	488,9	977,8	1466,7	1955,6
Маса $m_{ТР}$, 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 $Q_{ТР}$, МДж	91,87	183,7	275,62	367,5
Потужність q_{H_2O} , кВт/год	22,74	45,5	68,23	90,98
Потужність $q_{ТР}$, 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 ТР, 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 $\tau_{ТР}$, год	120 хв	240 хв	368 хв	492 хв

В результаті розрахунку визначено, що для забезпечення теплової потужності, наприклад МТА в 0,5 МВт при зазначених теплоносіях, необхідно використати 8 ємностей об'ємом 1500л.

Так, змінивши теплоносії на теплоакумуючу рідину можливо підвищити теплову продуктивність ТА. Змінивши конструкцію ТА використовуючи теплове ядро з фазовим переходом, можливо при тих же габаритних розмірах підвищити теплову потужність на 10÷15%. Дану методику розрахунку впроваджено в учбовому процесі студентів технічної спеціальності НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. І.Сікорського», Додаток Д.

7.1.2. Розташування матеріалу з фазовим переходом в тепловому акумуляторі ємнісного типу

Огляд можливих прикладів застосування матеріалів з фазовим переходом представлено у оглядовій частині розділі 1.3 даної дисертаційної роботи. Оскільки в створюваному мобільному тепловому акумуляторі є обмеження щодо транспортування теплової енергії за температурним діапазоном, з конструктивних міркувань бкло прийнято рішення застосовувати матеріал з фазовим переходом у трубі типу триплекс, яка формує так зване «теплове ядро» по центру кожної ємності теплового акумулятору. У розділі 7 п.7.1.1 в результаті технологічного розрахунку було обрано стандартний корпус ємності об'ємом 1500л по центру якого встановлено «теплове ядро» заповнене РСМ. Розглядали застосування двох форм РСМ:

- у природному вигляді, рис. 7.1.1.;
- у інкапсульованому вигляді типу гранул фракційного складу до 5мм, рис. 7.1.2.

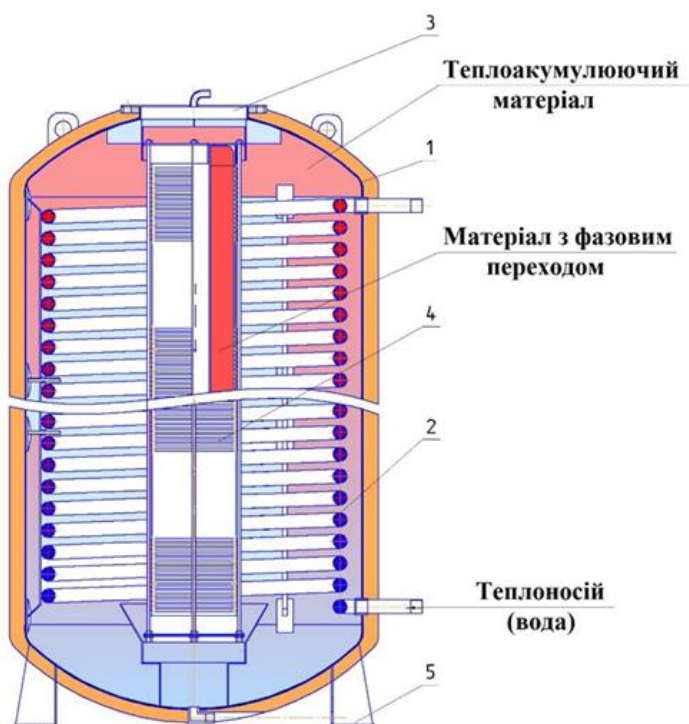
Тепловий акумулятор ємнісного типу представлений на рис. 7.1.1 має ємність (корпус) 1 заповнений теплоакумуючою рідиною, композиційний

склад якої підібрано і досліджено у розділі 4 даної дисертації. Ємність 1 обладнана «змієвиковим» теплообмінником 2 діаметром 32 мм в якому рухається теплоносії - вода. У верхній частині ємності 1 розташовано технологічний люк 3 внутрішнім діаметром 320мм. По центру ємності 1 встановлено «теплове ядро» 4 заповнене матеріалом з фазовим переходом. У якості матеріалу з фазовим переходом застосовано церезин, вибір і дослідження властивостей якого наведено у розділі 6 даної дисертаційної роботи.

Ємність 1 і «змієвиковий» теплообмінний апарат 2 виготовлено з вуглецевої сталі. 8 ємностей встановлено у мобільному тепловому акумуляторі, з'єднання контуру циркуляції між ТА здійснюється за допомогою труби діаметром 32мм, на якій передбачено по 2 крани, гільзу для термометра і місце для установки манометра. У нижній частині ємності передбачено дренаж, а у верхній – автоматичний кран для спуску повітря.

Кріплення ємностей в контейнері передбачено до підлоги контейнера, між собою ємності з'єднуються стяжними болтами. ТА розміщуються на опорах типу «лапа» 5.

У другому варіанті теплового акумулятору ємнісного типу аналогічної конструкції запропоновано використати у «тепловому ядрі» матеріал з фазовим переходом у вигляді гранул. Також в такій схемі передбачено окрему подачу теплоносія через шар матеріалу з фазовим переходом, рис. 7.1.2.



а)

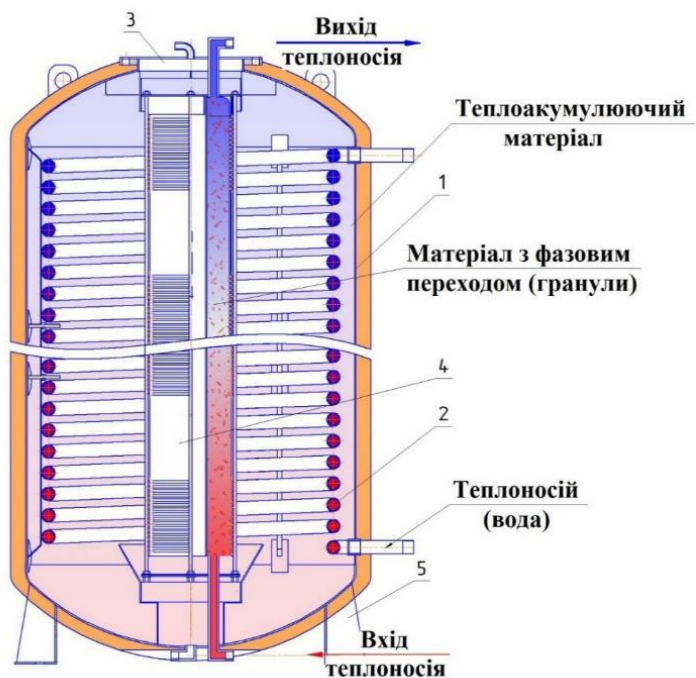


б)



в)

Рис. 7.1.1. Тепловий акумулятор ємнісного типу з РСМ церезином: а) загальний вигляд ТА; б) «теплове ядро» з РСМ; в) порожнє «теплове ядро» [156].



а)



б)

Рис. 7.1.2. Тепловий акумулятор ємнісного типу з РСМ у інкапсульованому вигляді: а) загальний вигляд ТА; б) загальний вигляд РСМ [156].

Оскільки потік теплоносія (води), що проходить через шар інкапсульованого РСМ може викликати осциляції і резонувати під час руху транспортування з рухом автомобіля, було проведено моделювання осцилюючого потоку рідини в пористому середовищі розділ 3 п.3.3. даної дисертації. У результаті математичного моделювання підтверджено виникнення осциляцій і досліджено характер їх розповсюдження по каналі («тепловому ядрі»). Тому, інкапсульований РСМ при розташуванні у «тепловому ядрі» було вирішено не застосовувати. Окремо необхідно зазначити, що для експерименту використовували РСМ європейського виробництва «CRODATHERM. Bio-Based Phase Change Material» [222], вартість якого в рази перевищує вартість церезину. Оскільки, РСМ у інкапсульованому вигляді на території України не виробляється.

Отже, в результаті проведених експериментальних і теоретичних досліджень та конструктивних і технологічних розрахунків було створено конструкцію ємнісного теплового акумулятору з двома робочими ємностями в якому використано три робочих тіла:

- теплоакumuлююча рідина, яка заповнює весь об'єм ємності (корпусу 1) ТА;
- матеріал з фазовим переходом – церезин, який розташований у «тепловому ядрі» 2 встановленому по центру ємності ТА 1;
- теплоносії - вода, що рухається по спіралі у «змієвиковому» теплообмінному апараті 3, рис. 7.1.3.

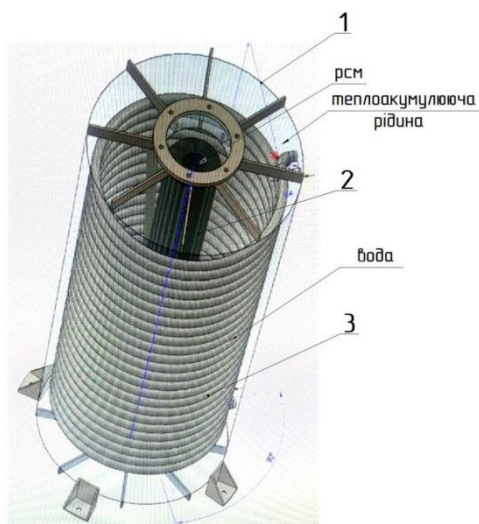
Ємність теплового акумулятору встановлено на чотирьох опорах 4 і за допомогою анкерних болтів кріпиться до корпусу контейнера у випадку МТА-0,5МВт.

Тепловий акумулятор ємнісного типу має дві металеві ємності:

- зовнішню ємність 1 заповнену теплоакumuлюючою рідиною.
- ємність 2 «теплове ядро», що встановлена в центрі ємності 1 заповнена РСМ матеріалом і герметично закрита. Ємність 2 називається «тепловим ядром», і забезпечує підвищення теплоакumuлюючої здатності

акумулятора, вирівнює поле температур в об'ємі акумулятора, зменшує стратифікацію по висоті акумулятора, скорочує час «зарядки» і подовжує час «розрядки» [33,156].

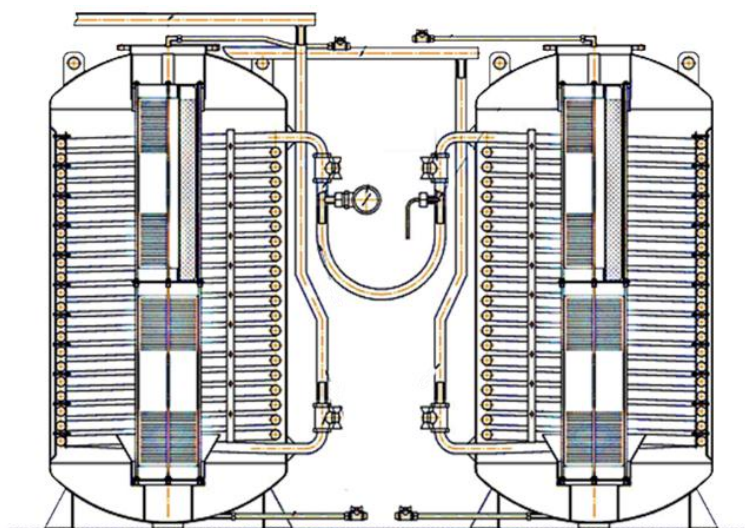
Для заповнення «теплого ядра» використовували церезин, з фазовим переходом в температурному діапазоні 61–78 °С, що співпадає з робочими температурами створюваного мобільного теплового акумулятору. Проведені дослідження змін питомої теплоємності до і після термоцикування, довели доцільність застосування церезину, у розділі 6 даної дисертації наведено результати досліджень.



а)



б)



в)



г)

Рис. 7.1.3. Тепловий акумулятор ємнісного типу:
 а) принципова схема ТА ємнісного типу; б) загальний вигляд ТА ємнісного типу; в) схема з'єднання ТА в МТА-0,5МВт; г) реалізація з'єднання ТА в МТА-0,5МВт [156,217,218].

7.1.3. Розрахунок напружено-деформованого стану на міцність ємності теплового акумулятора при транспортуванні

Для оцінки енергобезпеки ТА необхідно враховувати складні умови навантаження, які виникають в процесі роботи, тому розробка методики розрахунку напружено-деформованого стану елементів ємності акумулятора, що працює в умовах високого навантаження. Класичні аналітичні методи розрахунку, які використовуються в інженерних розрахунках, не завжди

адекватно описують навантаження що діють на обладнання. Для точного моделювання напруженого стану та аналізу енергобезпеки, необхідно застосовувати чисельні методи розрахунку [205].

Навантаження, що діють на будь-яку конструкцію, можуть бути поділені на дві категорії:

- 1) навантаження, що викликаються зовнішніми силами (гідравлічний тиск, вага та інше);
- 2) навантаження, обумовлені деформаціями різного походження (технологією виготовлення, складання, монтажу, зміною температури). При проведенні розрахунків на міцність елементів МТА потрібно враховувати обидві категорії. Методи розрахунку, засновані на принципі оцінки міцності за максимально допустимим навантаженням [206-208].

Метою проведеного розрахунку є знаходження напружено-деформованого стану елементів мобільного теплового акумулятора, який розрахований на тривалу експлуатацію при перевезенні транспортними засобами в умовах температурного і силового навантаження. Для досягнення поставленої мети необхідно вдосконалити математичну модель розрахунку від дії зовнішніх навантажень для визначення товщини стінки корпусу акумулятору ємнісного типу з урахуванням стану його елементів та зварних з'єднань [205].

7.1.3.1. Методика проведення розрахунку напружено-деформованого стану

Визначення напружено-деформованого стану елементів конструкцій ТА ємнісного типу у варіаційному формулюванні на основі мінімуму потенційної енергії може бути сформульована як задача мінімізації квадратичного функціонала, де необхідно знайти переміщення u , v , w , яке задовольняє умовам

$$u \in V, \quad F(u) = \inf_{v \in V} F(v). \quad (7.1.3.1)$$

Відносно V передбачається, що це Гільбертовий простір. Елементи, що належать простору V , задовольняють кінематичним граничним умовам задачі і вимогам гладкості рішення, що шукається [209]. Функція $F(v)$ являє собою потенційну енергію системи і визначається за виразом

$$F(v) = \frac{1}{2} a(v, v) - f(v). \quad (7.1.3.2)$$

Ці форми визначені і безперервні в просторі V . З енергетичної точки зору $\frac{1}{2} a(v, v)$ визначає потенційну енергію пружної деформації конструкції, $f(v)$ є роботою зовнішніх навантажень. Якщо V – повний простір, тобто будь-яка фундаментальна послідовність в ньому сходиться (до елементу з V), білінійна форма $a(u, v)$ безперервна [209]

$$\exists a > 0, \quad \forall u, v \in V, \quad |a(u, v)| \leq a \|u\|_V \|v\|_V \quad (7.1.3.3)$$

симетрична

$$a(u, v) = a(v, u), \quad \forall u, v \in V \quad (7.1.3.4)$$

та коерцитивна, тобто

$$\exists \beta > 0, \quad \forall v \in V, \quad \beta \|v\|_V^2 \leq a(v, v), \quad (7.1.3.5)$$

а лінійна форма $f(v)$ безперервна, то задача мінімізації функціонала має єдине рішення $u \in V$ [1]. Тут $\|\cdot\|_V$ – норма Гільбертового простору, яка дорівнює:

$$\|v\|_V = (v, v)_V^{1/2}, \quad \forall v \in V. \quad (7.1.3.6)$$

Оскільки точний розв'язок аналітичними методами для складних конструкцій з реальними граничними умовами знайти важко, а деколи і неможливо, використовуються чисельні методи. Вирішення прикладних задач чисельними методами будуються шляхом зведення вихідної континуальної задачі до скінченномірної. Для цього нескінченномірний простір допустимих функцій V замінюють скінченномірними V_h і на ньому шукають систему переміщень, що доставляють мінімум функціонала. При побудові скінченномірних просторів V_h використовуються частково-

поліноміальні функції на підобластях. Коефіцієнти полінома в кожному багатокутнику вибираються таким чином, щоб забезпечити необхідну гладкість і однозначне визначення полінома [210]. При побудові варіаційно-сіткових схем функціонал потенційної енергії системи на скінченномірному просторі допустимих функцій V_h має вигляд

$$F(v_h) = \frac{1}{2} a(v_h, v_h) - f(v_h), \quad v_h \in V_h \quad (7.1.3.7)$$

і варіаційна задача замінюється наближеною

$$u_h \in V_h, \quad F(u_h) = \inf_{v_h \in V_h} F(v_h), \quad (7.1.3.8)$$

яка також має єдине рішення. Враховуючи те, що елементами ТА є складні пластинчасто-оболонкові системи, для побудови скінченномірних просторів використовується апроксимація функції по трикутниках. Вибір трикутного кінцевого елемента обумовлений його простотою апроксимації і можливістю досить точно описувати топологію об'єктів з врахуванням сполучень поверхні [211,212].

При розв'язанні задачі визначення напружено-деформованого стану області, що займає тіло, розбивається на кінцеве число трикутних елементів. Шукані переміщення u , v , ω в межах кожного трикутника апроксимуються відповідно наступним функціям [213]

$$u_h = \frac{1}{2\Delta} [(a_i + b_i + c_i)u_i + (a_j + b_j + c_j)u_j + (a_k + b_k + c_k)u_k], \quad (7.1.3.9)$$

$$v_h = \frac{1}{2\Delta} [(a_i + b_i + c_i)v_i + (a_j + b_j + c_j)v_j + (a_k + b_k + c_k)v_k] \quad (7.1.3.10)$$

$$\omega_h = \omega_i L_i + \omega_j L_j + a_k L_k + a_1 L_i^2 L_j + a_2 L_j^2 L_k + a_3 L_j^2 L_i + a_4 L_j^2 L_k + \quad (7.1.3.11)$$

$$+ a_5 L_k^2 L_i + a_6 L_k^2 L_j + a_7 L_i L_j L_k$$

де

$$\begin{aligned} a_1 &= \omega_1 - \omega_2 - b_3 \phi_1 - c_3 \psi_1, \\ a_2 &= \omega_1 - \omega_3 + b_2 \phi_1 + c_2 \psi_1 \\ a_3 &= \omega_2 - \omega_1 + b_3 \phi_2 + c_3 \psi_2 \\ a_4 &= \omega_2 - \omega_3 - b_1 \phi_2 - c_1 \psi_2, \end{aligned} \quad (7.1.3.12)$$

$$a_5 = \omega_3 - \omega_1 - b_2\phi_3 - c_2\psi_3,$$

$$a_6 = \omega_3 - \omega_2 + b_1\phi_3 + c_1\psi_1,$$

$$a_7 = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^6 a_k,$$

де $L_i, i=1,2,3$ – L – координати, які визначаються співвідношеннями

$$L_i = \frac{1}{2\Delta} (a_i + b_i x + c_i y) \quad (7.1.3.13)$$

Коефіцієнти з іншими індексами отримуються за допомогою кругової перестановки індексів 1,2,3. Величина Δ дорівнює площі трикутника

$$\Delta = \frac{1}{2} (b_2 c_3 - b_3 c_2) \quad (7.1.3.14)$$

$\phi_i = \left(\frac{\partial \omega_0}{\partial y}\right)_i$, $\psi_i = -\left(\frac{\partial \omega_0}{\partial x}\right)_i$ кути повороту нормалі, відповідно навколо осей x та y в i -ому вузлі

$$a_i = x_i y_k - x_k y_i, \quad b_i = y_i - y_k, \quad c_i = x_k - x_j. \quad (7.1.3.15)$$

Таким чином, після визначення переміщень використовуючи співвідношення Коші і закон Гуку визначаємо напруження

$$\{\sigma\} = [G]\{\varepsilon\}. \quad (7.1.3.16)$$

Для вирішення задачі мінімізації функціонала пропонується використовувати метод покоординатного спуску в якому вектор вузлових невідомих на V_n будується таким чином

$$\mathbf{v}^{k+1} = \mathbf{v}^k + \beta \lambda_i^{k+1} \mathbf{e}_i \quad i=1, \dots, N, \quad (7.1.3.17)$$

де $\mathbf{e}_i$ – одиничний вектор в напрямі $\mathbf{v}^k$, λ_i^{k+1} – крок, β – параметр релаксації. Величина кроку визначається з умов максимального зменшення функціонала.

$$\frac{\partial \Delta F}{\partial \lambda_i^{k+1}} = 0 \quad (7.1.3.18)$$

Величина параметра релаксації обчислюється за формулою з [213]

$$\beta = 1 + \frac{\|\lambda^{k+1}\|}{\|\lambda^k\|} \quad (7.1.3.19)$$

При практичній реалізації ітераційний процес продовжується до тих пір, поки відношення $\frac{\|\lambda^k\|}{\|v^k\|}$ не стане менше наперед заданого $\varepsilon > 0$. Таким чином, критерій зупинки ітераційного процесу записується так

$$\frac{\|\lambda^k\|}{\|v^k\|} < \varepsilon \quad (7.1.3.20)$$

7.1.3.2. Результати розрахунку напружено-деформованого стану ємності теплового акумулятора

Використовуючи дану методику розрахунку були проведені дослідження напружено-деформованого стану патрубків, корпусу та днища теплового акумулятора та оцінено ресурс роботи цих конструкцій. Граничні умови задані з урахуванням реальних умов роботи акумулятора ємнісного типу. Результати моделювання представлено на рис.7.1.4. - 7.1.7 [209].

З рис. 7.1.4, очевидно результат розрахунку на статичну міцність збірної конструкції ємності акумулятора з урахуванням патрубків, днищ, ребер жорсткості та зварних з'єднань: максимальне напруження виникає в зоні вварення патрубків, але дане напруження по Мізесу є значно меншим за граничні умови міцності [209]. Таким чином, максимальне напруження, що виникає в даній конструкції, буде

$$\sigma_{\text{розрах}}^{\text{max}} = 6,34 \text{ МПа} < [\sigma]_T = 225 \text{ МПа}$$

Перевищення допустимого напруження не виявлено.

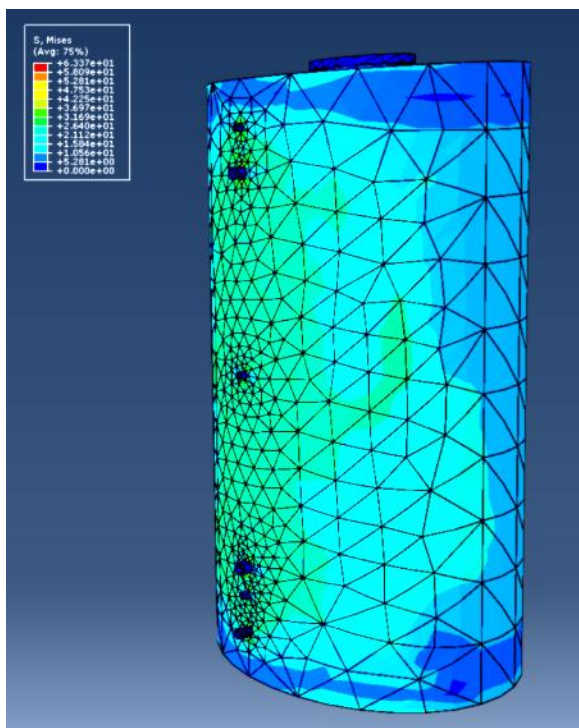


Рис. 7.1.4. Поля еквівалентних напружень зовнішньої сторони ємності ТА [205].

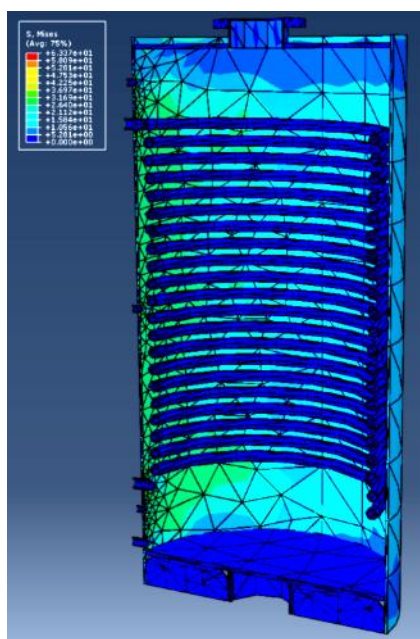


Рис. 7.1.5. Поля еквівалентних напружень у розрізі ємності акумулятора [205].

Як видно з рис. 7.1.5. і 7.1.6 найбільше напруження виникає у місцях з'єднання патрубків змійовика з корпусом акумулятора.

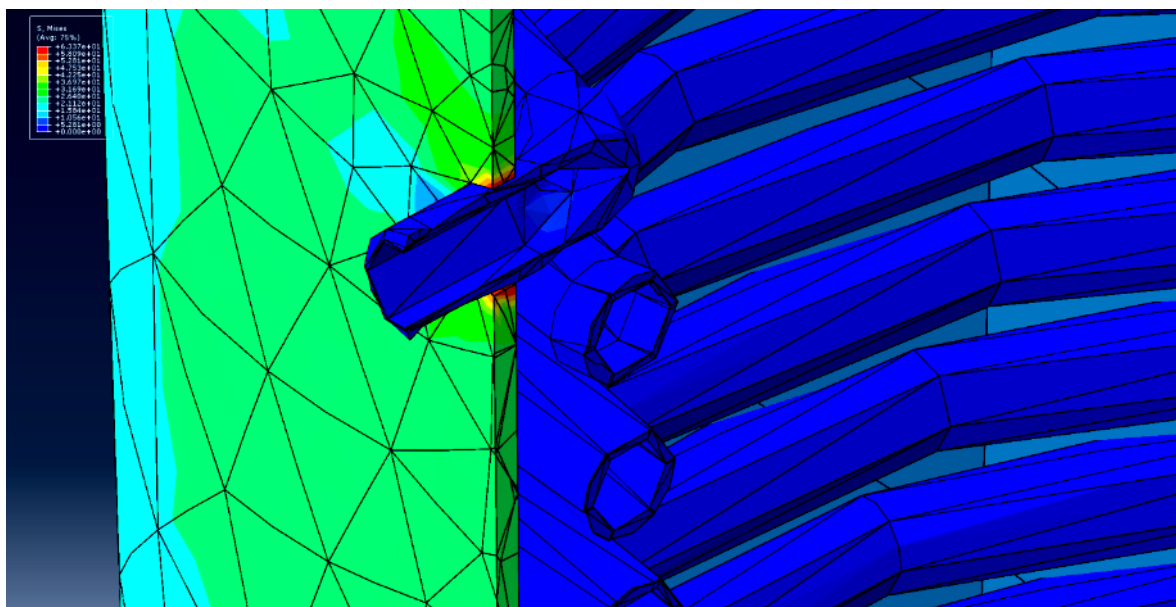


Рис. 7.1.6. Найбільш навантажені ділянки конструкції ємності акумулятора в місці вварення патрубка [205].

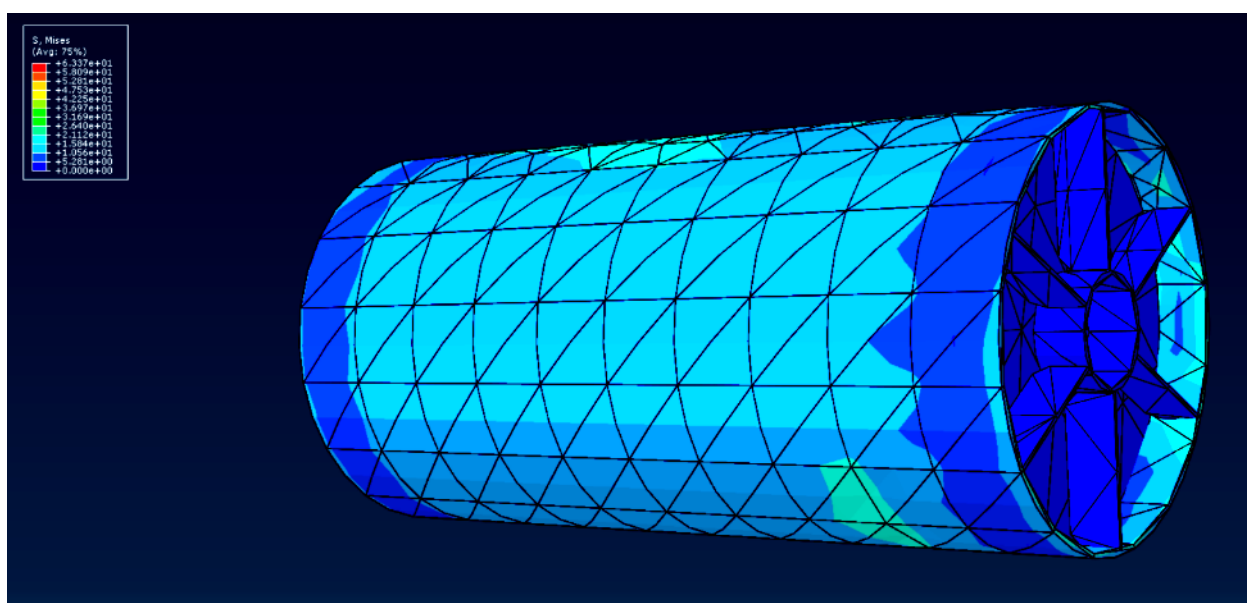


Рис. 7.1.7. Навантаження лінійних ділянок конструкції акумулятора ємнісного типу [205].

Лінійна частина бака має збільшене напруження у місцях зварного з'єднання з днищами, що викликано геометричними особливостями та залишковим термонапруженням. При цьому напруження по Мізесу у місцях примикання не перевищує допустимого.

$$\sigma_{\text{розрах}}^{\text{max}} = 1,58 \text{ МПа} < [\sigma]_T = 225 \text{ МПа} \quad (7.1.3.21)$$

Отже, розроблена методика визначення напружено-деформованого стану елементів акумулятора ємнісного типу, що працює в реальних умовах температурного і силового навантаження, дозволяє оцінити надійність конструкції і зробити необхідні висновки з точки зору можливості руйнування конструкції і дати рекомендації по оптимальному проектуванню. Дозволяє оцінити вплив потенційної енергії на пружну деформацію, що впливає на надійність конструкції.

Для визначення допустимо можливого напруження конструкції акумулятора було визначено кінематичні граничні умови. Оскільки ємність акумулятора являє собою складну геометричну систему, було вдосконалено математичну модель розрахунку коефіцієнта полінома та вирішення задачі мінімізації функціонала для визначення напруження за Мізесом з врахуванням реальної геометрії обладнання [205].

Проведена оцінка напружено-деформованого стану патрубків, корпусу та днища теплового акумулятора та оцінено ресурс роботи цих конструкцій, при цьому допустиме напруження не перевищує 225 МПа.

7.2. Мобільний тепловий акумулятор. Розроблення робочої конструкторської документації призначеної для виготовлення та випробування дослідного зразка МТА -0,5МВт

7.2.1. Загальний опис та технологічна схема мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт

Загальний вигляд дослідного зразка мобільного теплового акумулятору МТА-0,5 МВт наведено на рис.7.2.1. Запропонована конструкція представляє функціональне поєднання гідравлічної секції індивідуального теплового пункту (ІТП), акумуляційної секції в якій розташовано акумулятори

ємнісного типу та автоматизованої системи моніторингу та контролю [19,33,44,109].

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

І секція гідравлічна – це індивідуальний тепловий пункт, що забезпечує процес зарядки і розрядки дослідного зразка МТА-0,5 МВт регулюючи параметри подачі теплоносія (води). З'єднання зі споживачем та джерелом здійснюється за допомогою швидкороз'ємного з'єднання типу «CamLock» 3.

ІІ секція акумуляційна – забезпечує акумуляційні процеси МТА-0,5 МВт і складається з 8 ємнісних акумуляторів 4 оригінальної конструкції [156]. Ємнісні акумулятори з'єднані паралельно (ІІ а) і послідовно (ІІ б) за допомогою системи трубопроводів 5 діаметром 54мм. На трубопроводі розташовано запірно-регулювальне обладнання та вимірювальні прилади. В процесі експлуатації МТА-0,5МВт, паралельне з'єднання виявилось більш ефективним за показниками часу зарядки і розрядки та ефективності вилучення теплової енергії, що підтверджується експериментальними даними, представленими в п.7.3 даної дисертації.

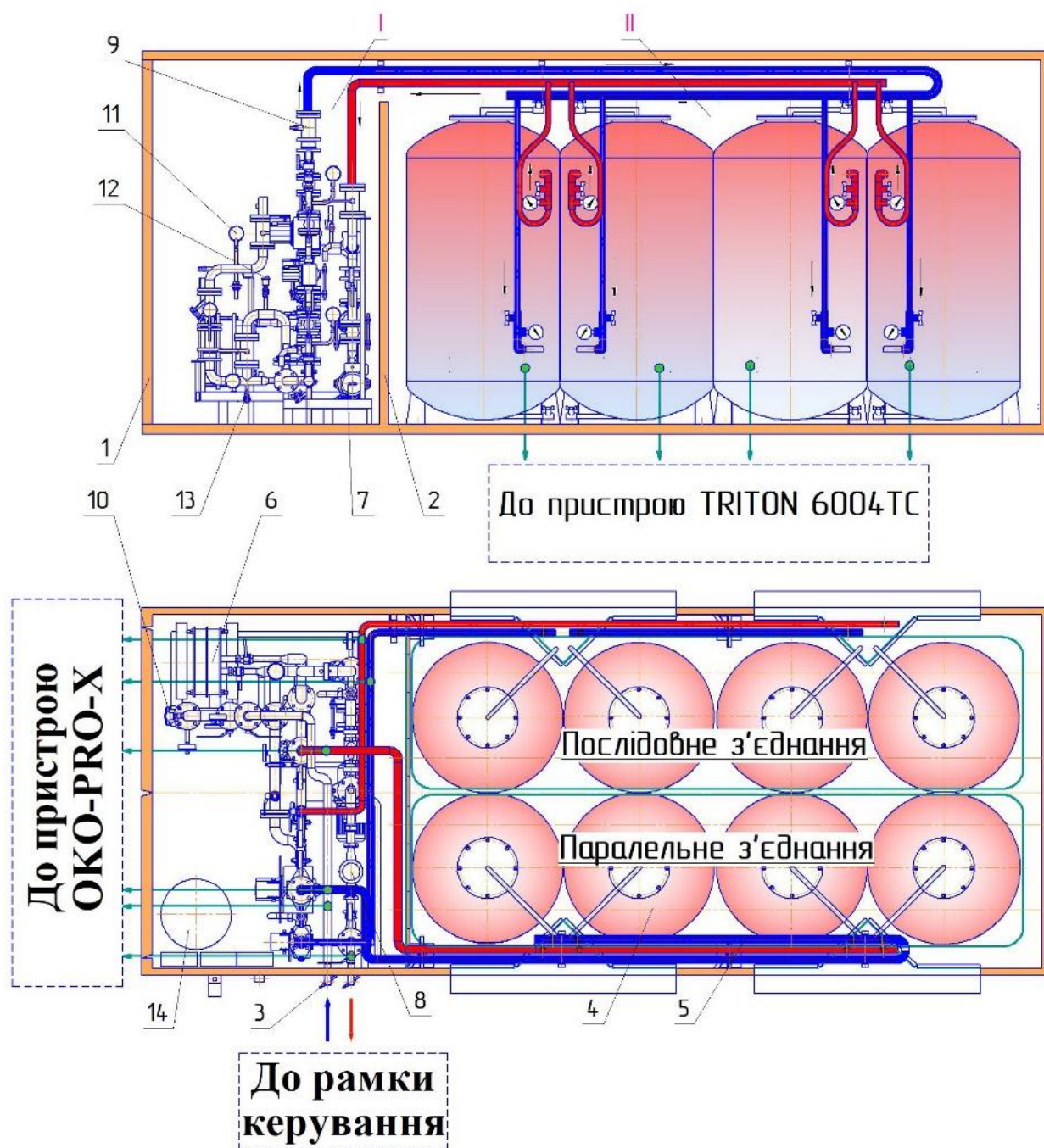


Рис. 7.2.1. Дослідний зразок мобільного теплового акумулятора МТ-0,5 МВт:
 1 – контейнер; 2 – стінка; 3 – швидкокороз'ємні з'єднання типу Camlock;
 4 – ТА; 5 – трубопровід; 6 – пластинчатий теплообмінний апарат;
 7 – циркуляційні насоси; 8 – лічильник теплової енергії; 9 – запірна арматура;
 10 – сітчастий фільтр; 11 – манометр; 12 – запобіжний клапан; 13 – дренаж;
 14 – розширювальний бак [217,218].

I секція гідравлічна. Індивідуальний тепловий пункт – це контур системи теплопостачання, що приєднується до джерела і споживача теплопостачання за незалежною схемою включає в себе:

- розбірний пластинчастий теплообмінник 6. У проекті було використано розбірний пластинчастий теплообмінник, на основі пластин фірми «Funke». Розрахунок теплообмінника проводився за допомогою сертифікованого програмного забезпечення підприємства виробника. Під час розрахунку теплообмінника було прийнято 15% запас поверхні теплообміну, що забезпечить надійну експлуатацію теплообмінника в усіх робочих режимах;

- циркуляційні насоси 7. В даному проекті були використані енергоефективні насоси фірми «Wilo», таблиці 7.2. Підбір насосів виконувався за допомогою сертифікованого програмного забезпечення;

- лічильник теплової енергії SKYLAR INT 8 8 працює 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 та вимірювальне обладнання. Паспорт на розроблення Індивідуального теплового пункту з повним переліком встановленого обладнання наведено в Додатку Е даної дисертації [217,218].

Таблиця 7.2. Технічні характеристики індивідуального теплового пункту

Параметри	Витрата $V, \text{м}^3/\text{год}$	Напір H , м	Маркування насосу
Система теплопостачання	3,0	27,0	MHI 206-1/E/1-230-50-2
II а секція, паралельне з'єднання ємностей	3,0	7,82	TOP-S 25/10 EM PN6/10
II б секція, послідовне з'єднання ємностей	3,0	13,7	TOP-S 40/15 EM PN6/10

II секція акумуляційна дослідного зразка теплового акумулятору включає, рис. 7.2.1.:

- вісім теплових акумуляторів ємнісного типу оригінальної конструкції 4, [156];
- запірну арматуру;
- контролююче-вимірювальне обладнання [217,218].

Загальний вигляд секції акумуляції МТА-0,5МВт представлено на рис. 7.2.2. На зображенні зафіксовано момент комплектації акумуляційної секції до обв'язки трубопроводом та теплоізоляції, рис. 7.2.2а.

Для герметизації і запобігання теплових втрат в секції акумуляції було застосовано заливний пінополіуретан Elastopor Н 1701/9 щільністю 10кг/м^3 , марки Elastospray що застосовується для термоізоляції великих об'ємів. Процес термоізоляції секції акумуляції представлено на рис. 7.2.2.б і 7.2.2.в.

Для фіксації трубопроводу і додаткової термоізоляції секція акумуляції обшивається деревостружковою плитою, рис. 7.2.2.д.



а



6)



B)



г)



д)

Рис. 7.2.2. Процес комплектації секції акумуляції МТА-0,5МВт:
 а) розташування секції акумуляції і ІТП в контейнері; б), в), г) етапи термоізоляції секції акумуляції; д) секція акумуляції в робочому вигляді.

Порядок роботи МТА-0,5МВт.

Розрядка мобільного теплового акумулятору МТА-0,5 МВт здійснюється у наступному порядку, рис. 7.2.1: теплоносій (вода) від індивідуального теплового пункту І надходить до теплових акумуляторів 4 через кульовий кран і за допомогою сітчастого фільтра 10 очищується від механічних домішок. Проходячи по акумуляційній секції через акумулятори ємнісного типу 4, теплоносій нагрівається до заданої температури. Далі, теплоносій рухається до ІТП до теплообмінника 6. Теплоносій з контуру теплоакумуляції II передає теплоту через пластини теплообмінника 6 і нагріває теплоносій контуру системи тепlopостачання споживача. Зарядка здійснюється у зворотному порядку [217,218].

Забезпечення циркуляції теплоносія відбувається за допомогою однофазних циркуляційних насосів 7. Керування швидкістю обертання виконується вручну.

Запобіжно-скидний клапан 12 захищає систему від підвищення тиску при температурному розширенні теплоносія.

Облік тепла на потреби споживача організовано за рахунок використання лічильника теплової енергії SKYLAR INT 8 8, до складу якого входить обчислювач теплової енергії, витратомір, який встановлено на прямому та зворотному трубопроводах зі сторони споживача.

Підживлення системи циркуляції здійснюється через дренаж 13, розташований на зворотному трубопроводі зі сторони споживача. Для компенсації та підтримання тиску встановлено мембранний розширювальний бак 14.

На прямому і зворотному трубопроводі з боку споживача і внутрішньому контурі циркуляції встановлені датчики температури котельної води.

7.2.2. Проектування та виготовлення блочного індивідуального теплового пункту МТА-0,5МВт

Розрахунок та підбір основного та допоміжного обладнання проводився згідно вихідних даних наведених в таблиці 7.1. В даному об'єкті для системи тепlopостачання прийнята незалежна схема приєднання до джерела тепlopостачання. Проект розроблено у відповідності до діючих норм і правил [214-216].

Облік теплової енергії організовано за рахунок застосування лічильника SKYLAR INT 8 підприємства «Антап Україна», до складу якого входять обчислювач теплової енергії, витратомір та перетворювачі опору, данні з вказаного обладнання представлено в п. 7.2.3 даного розділу.

Вибір лічильника теплової енергії здійснювався шляхом порівняння розрахункових витрат теплоносія в системі тепlopостачання так щоб не було перевищення максимальної витрати згідно паспортних значень приладу.

Розрахункова витрата теплоносія:

$$G_{o\ max} = \frac{3,6\ Q_{max}}{c_p(t_1 - t_2)} \cdot 10^{-3} = 4,31\ \text{т/год}$$

Таким чином, за розрахунковими витратами теплоносія обираємо обчислювач теплової енергії SKYLAR INT 8 з витратоміром DN40, для якого номінальна витрата становить $q_{max} = 10\ \text{т/год}$.

Електропостачання ІТП передбачається на напрузі 220В з системою заземлення TN-C-S від існуючого вводу. Основні показники ІТП приведені в таблиці 7.3. Принципова схема ІТП представлена на рисунку 7.2.3.

Таблиця 7.3. Основні показники потужності ІТП

Параметр	Значення
Встановлена потужність, кВт	6,35
Розрахункова максимальна потужність, кВт	4,60
Розрахунковий максимальний струм, А	23,60

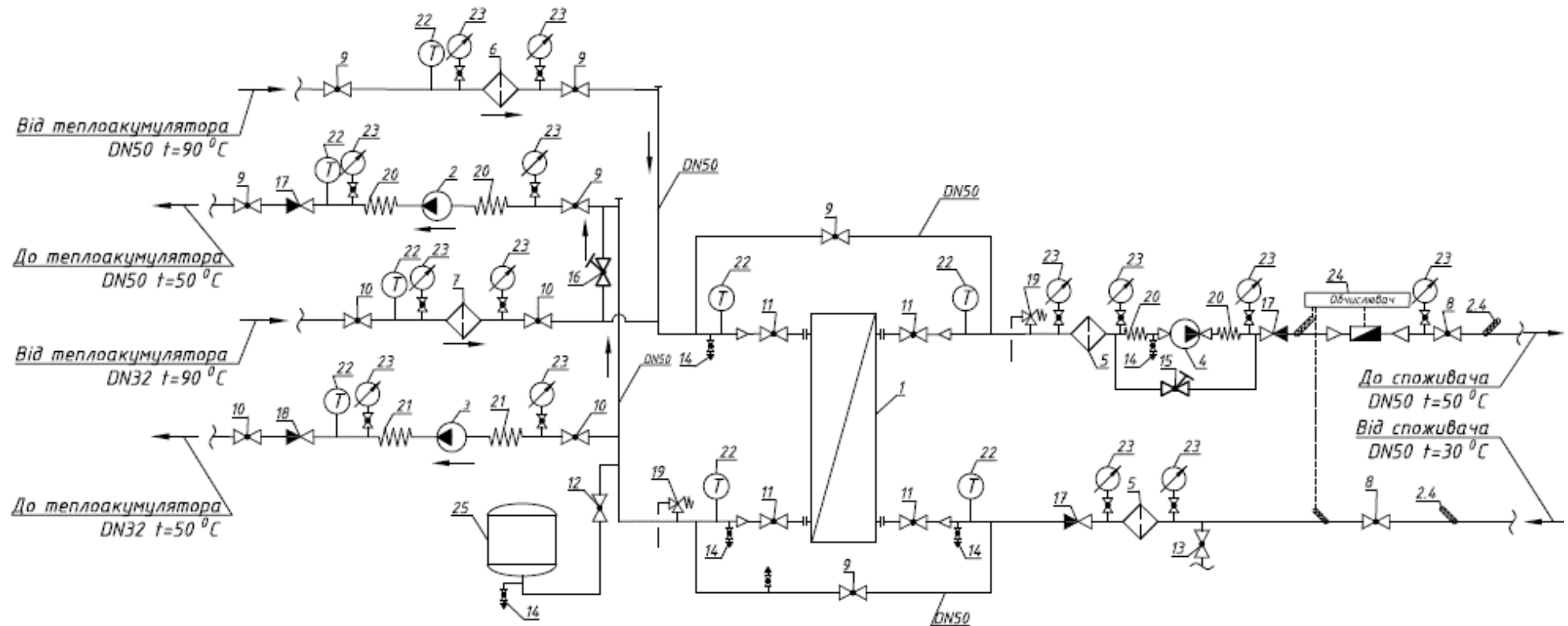


Рис. 7.2.3. Принципова схема індивідуального теплового пункту МТА-0,5МВт:

1 – теплообмінний апарат пластинчатий ФП-05 (23 пл); 2 - насос циркуляційний TOP-S 40/15 ЕМ РN6/10, 3 - насос циркуляційний TOP-S 25/10 ЕМ РN6/10; 4 - насос циркуляційний МНІ 206-1/Е/1-230-50-2; 5,6,7 - сітчастий фільтр фланцевий; 8-14 - кульовий кран фланцевий; 15,16 - балансувальний клапан ручний; 17-19 - зворотний клапан; 20,21 - гнучка вставка фланцева; 22 - термометр біметалевий границя виміру 0÷120°С; 23 - гліцериновий манометр границя вимірювання 0÷1,6 МПа; 24 - механічний лічильник теплової енергії муфтовий DN40; 25 - мембранний розширювальний бак V=80 L; 26 - автоматичний повітровідник з кульовим краном DN15; б.п. - Camloкс, з'єднання з фіксатором кулачкового типу DN50.



а)



Рис. 7.2.4. Гідравлічна секція. Фото індивідуального теплового пункту МТА-0,5МВт: а) процес комплектації ІТП; б) робочий стан ІТП

ІТП забезпечує стабільну циркуляцію теплоносія в системі циркуляційного контуру. У якості теплоносія використана вода. Підібране

насосне обладнання забезпечує процес заряду і розряду МТА -0,5МВт. Процес створення ІТП наведено у Додатку Е даної дисертації.

7.2.3. Моніторинг основних робочих параметрів автоматичної системи моніторингу мобільного теплового акумулятору на базі спеціалізованого контролеру типу GSM-сигналізації "ОКО-PRO-X"

Для дистанційного моніторингу основних технологічних параметрів роботи МТА-0,5МВт використано багатофункціональний GSM – контролер ОКО-PRO-X рис. 7.2.5, який в режимі реального часу дозволяє отримувати характеристики роботи обладнання МТА-0,5МВт за показниками [219]:

- температура теплоносія на вході і виході МТА-0,5МВт та по технологічній лінії дослідного зразка у визначених місцях, згідно рис. 7.2.3. і рис. 7.2.;
- стан охоронної системи при відхиленні від маршруту дослідного зразка та при не санкціонованому доступі до секції ІТП;
- стан живлення дослідного зразка.



Рис. 7.2.5. GSM-контролер ОКО-PRO-X, [219].

GSM – контролер ОКО-PRO-X - це система з 16 програмованими входами/виходами, вибір призначення яких виконується через конфігуратор та має віддалені настройки, оновлення та моніторинг стану, а також голосове сповіщення і автоматичну перевірку балансу SIM-карти, що підвищують зручність, як настройки, так і

користування системами.

У разі виникнення тривоги на об'єкті пристрій виконує послідовно тривожний дзвінок і/або SMS-оповіщення на телефони користувачів в залежності від налаштувань груп і повідомлень, в разі необхідності включає вихід «Сирена» на запрограмований час. При зникненні і відновленні живлення 220 В і при використанні резервного акумулятора відбувається SMS-оповіщення користувачів. За допомогою призначених для користувача виходів можна здійснювати дистанційне керування обігрівачем, насосом, роутером та іншим, використовуючи мобільний телефон (за допомогою тонових команд в режимі голосового з'єднання, SMS- команд або через мобільний додаток під «Android» або «iOS») [219].

Даний контролер, в разі необхідності, можна увімкнути на пульт централізованого спостереження по протоколу «TCP-SurGard» через GPRS. Контроль доступу здійснюється за допомогою магнітконтактного датчика СМК-1Е, контроль температури — цифровим датчиком температури типу DS18B21. Додатково можуть бути встановлені — датчик наявності напруги 220В, датчик руху інфрачервоного типу SWAN QUAD та датчика затоплення ДЗНЗ-1.



Рис. 7.2.6. Датчик напівпровідний DS18B20



Рис. 7.2.7. Датчик магнітно-контактний СМК-1Е



Рис. 7.2.8. Звуковий оповіщувач SA-105

Контроль температури теплоносія в системі дослідного зразка МТА-0,5МВт здійснюється за допомогою встановлених напівпровідникових датчиків DS18B20, рис. 7.2.6.

Сповіщення про подію ТСП-сервера ОКО
 Monitor OKO <admin@oko.org.ua>
 Коду: alina_tsp@ukr.net

itp
 Зміна температури DS18B20-5
 2023-02-24 15:38:38

Назва сенсору	Значення
Стан охорони	ВИМКНЕНО
220В	ВИМКНЕНО
Зовнішнє живлення, В	12.5
Дротова зона-1	НОРМА
Дротова зона-2	ПОРУШЕНО
Дротова зона-3	ПОРУШЕНО
Дротова зона-4	ПОРУШЕНО
Дротова зона-5	ПОРУШЕНО
Дротова зона-6	ПОРУШЕНО
Дротова зона-7	ПОРУШЕНО
Дротова зона-8	ПОРУШЕНО
Температура приладу	ПОРУШЕНО
Викід-1	ВИМКНЕНО
Викід-2	ВИМКНЕНО
Викід-3	ВИМКНЕНО
Викід-4	ВИМКНЕНО
Викід-5	ВИМКНЕНО
Викід-6	ВИМКНЕНО
Викід-7	ВИМКНЕНО
Викід-8	ВИМКНЕНО
Напруга аналогового входу №1, В	0.0
Напруга аналогового входу №2, В	0.0
Напруга аналогового входу №3, В	0.0
Температура №1, С	50
Температура №2, С	52
Температура №5, С	53
Температура №6, С	53
Температура №7, С	50
Температура №8, С	54
Рівень GSM-сигналу	СЕРЕДНІЙ
GSM_rssi	13
Версія ПЗ	9.4.2
Версія HW	ОКО-PRO-X

Рис. 7.2.9. Повідомлення GSM-контролера ОКО-PRO-X.

позитивно впливає на стабільність роботи та підвищує строк служби обладнання, а також знижує час і витрати на обслуговування дослідного зразка.

В конструкції дослідного зразка мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт [115,116], застосовано механізм латентного збереження енергії, тому основним параметром контролю і моніторингу є температура. В дослідному зразку передбачено вимірювання температури в режимі реального часу при

Датчик магнітно-контактний (геркон) СМК – 1Е, рис. 7.2.7. Датчик застосовується як елемент охоронної сигналізації при спробі проникнення через двері і вікна. Підключається до GSM- контролера ОКО-PRO-X [219].

Провідний кімнатний звуковий оповісник SA-105, рис. 7.2.8., підключається до GSM- контролера ОКО-PRO-X і сигналізує про несанкційний доступ при відкритті дверей ІТП.

Результати вимірювань GSM-контролер ОКО-PRO-X надсилає у вигляді таблиці, рис. 7.2.9. В результаті оператор отримує необхідні параметри роботи дослідного зразка в режимі реального часу і має можливість реагувати оперативно при виникненні нестандартних ситуацій. Це

штатній роботі обладнання і, окремо, при проведенні експериментальних досліджень та проведенні пуско-налагоджувальних робіт. На технологічній лінії МТА-0,5МВт, представлено місце розташування напівпровідникових датчиків температури по висоті акумуляційних ємностей і трубопроводі у секції акумуляції і секції ІТП. При нормальній роботі обладнання вимірювання здійснюються за допомогою приладу багатофункційного лічильника SKYLAR INT 8 оснащеного витратоміром MTX 1A10.Df.2LO-YD4, рис. 7.2.10. Багатофункційний лічильник SKYLAR INT 8 призначений для вимірювання спожитої кількості теплоти в системах опалення/кондиціювання, об'ємної витрати теплоносія, температури теплоносія в подавальному та зворотному трубопроводах і різниці цих температур, теплової потужності, часу напрацювання поточного часу, дати та службової інформації [220].



а)



б)

Рис.7.2.10. Комплекс виміру теплової енергії, температури, часу:
а) багатофункційний лічильник SKYLAR INT 8; б) витратоміром MTX 1A10.Df.2LO-YD4 [220].

При проведенні експериментальних досліджень та пусконалагоджувальних робіт додатково застосовується прилад TRITON 6004TC - це мікропроцесорний пристрій для реєстрації та перетворення сигналів, отриманих за допомогою термопар або інших датчиків. В дослідному зразку МТА-0,5МВт було використано напівпровідникові датчики. Мікропроцесорний пристрій TRITON 6004TC з комутаційним

модулем TRITON C37 та датчиками температури АТФА.687265.016 використовується для моніторингу віддалених об'єктів, наукового експерименту, контролю параметрів технологічних процесів тощо [221], рис. 7.2.11.



Рис. 7.2.11. Мікропроцесорний пристрій TRITON 6004TC

У випадку штатної роботи дослідного зразка МТА-0,5МВт паралельно багатofункційному лічильнику SKYLAR INT 8 проводить вимірювання багатofункціональний GSM-контролер «ОКО-PRO-X» [219]. GSM-контролер «ОКО-PRO-X» загалом, застосовується для дистанційного контролю та керування, контролю доступу, контролю температури та інше. Історія збереження подій в хмарному (cloud) сервісі з буфером в контролері до 16 подій, моніторинг через конфігуратор за допомогою комп'ютера, чи пристрою на базі Android. Користувач МТА-0,5МВт отримує дані роботи обладнання в режимі реального часу у вигляді сповіщень на телефон або персональний комп'ютер, рис. 7.2.12.

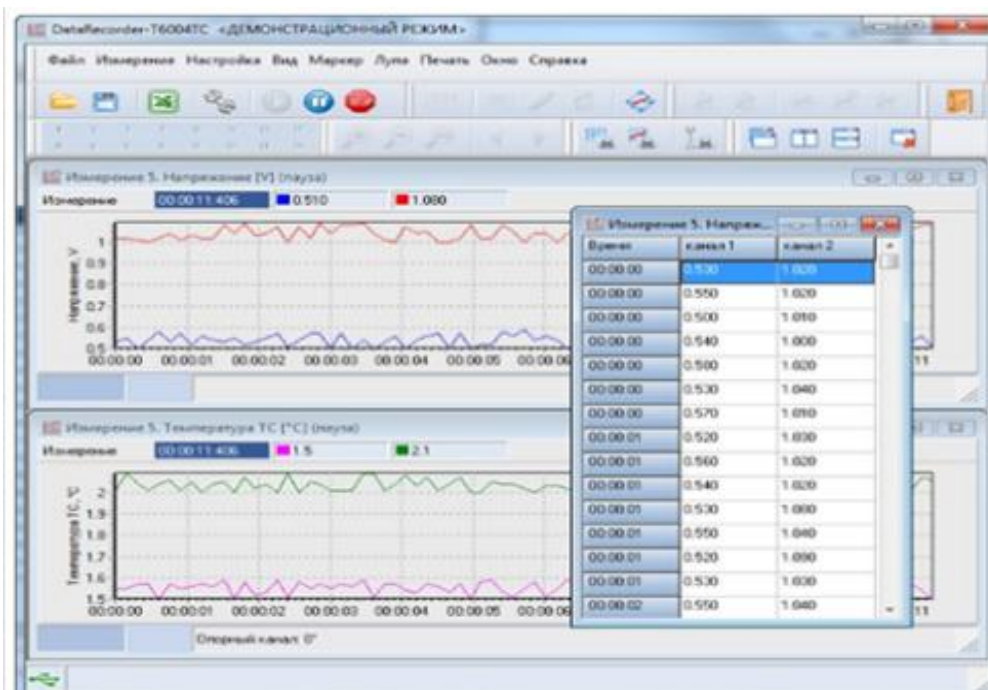


Рис.7.2.12
Стандартний
вигляд
моніторингу
параметрів
роботи МТА-
0,5МВт.

Такий паралельний моніторинг технологічних показників та температури зокрема, дозволяють отримувати повний об'єм інформації стосовно температурних режимів та теплопродуктивності. В результаті відбувається підвищення надійності роботи обладнання та автоматизація керування МТА-0,5МВт, рис. . Забезпечення своєчасного аналізу аварійних ситуацій та прискорення реакції обслуговуючого персоналу впливають на зниження аварійності та вартості витрат на обслуговування, зменшення часу відновлення обладнання після відмов та аварій [219, 220].

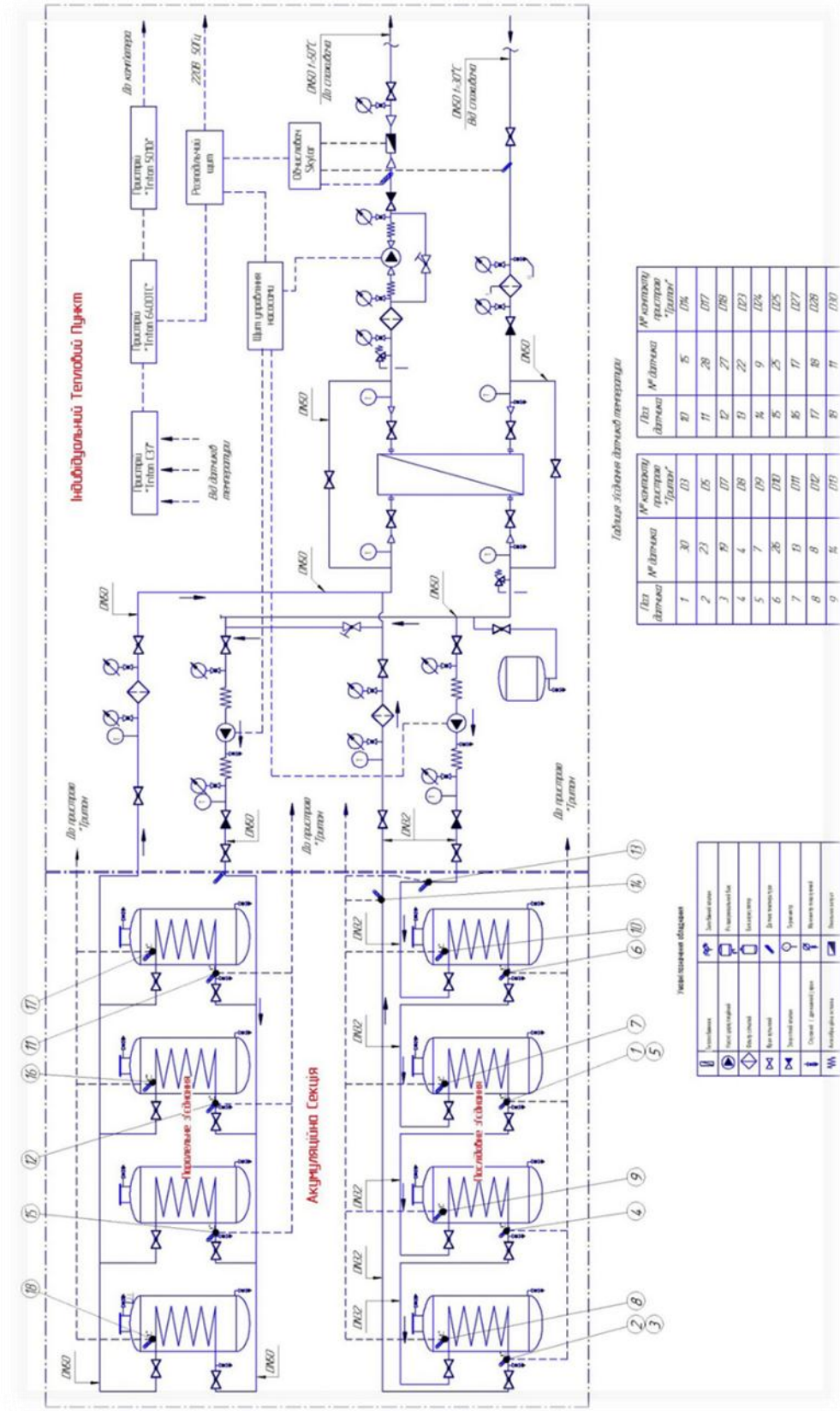


Рис. 7.2.13. Технологічна схема розташування датчиків і вимірювального обладнання у системі АСК дослідного зразка МГА-0,5МВт

7.2.4. Схема підключення мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт до споживача і джерела

Система підключення дослідного зразка мобільного теплового МТА-0,5 МВт представлена на рис.7.2.14. і складається з технологічних контурів [219]:

«А» – контур циркуляції $2,0 \text{ м}^3/\text{год}$, паралельного підключення 4 теплоаккумуляційних ємностей кожен об'ємом 1500 літрів, в складі МТА-0,5 МВт;

«В» – контур циркуляції $2,2 \text{ м}^3/\text{год}$, послідовного підключення 4 теплоаккумуляційних ємностей кожен об'ємом 1500 літрів, в складі МТА-0,5 МВт;

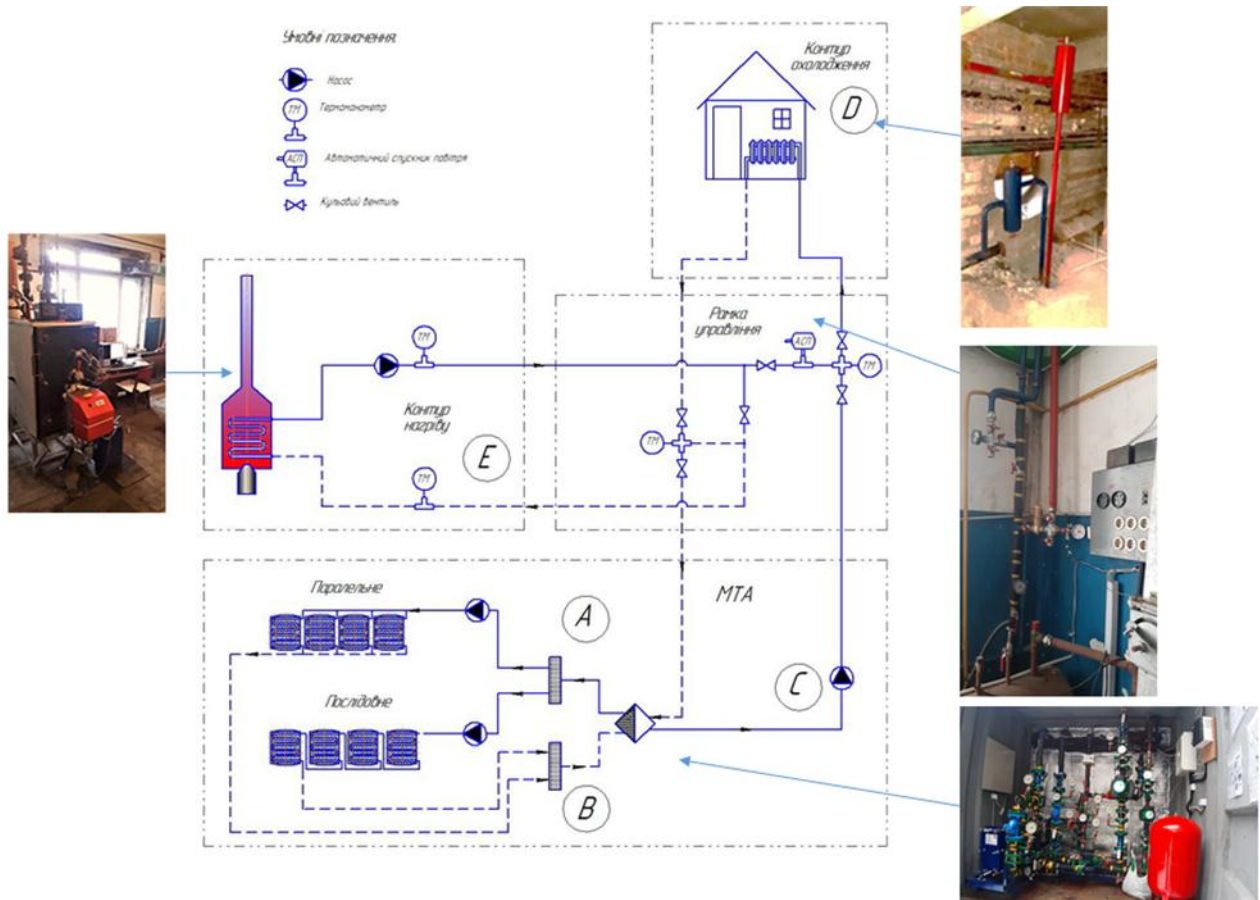
«С» – контур мережевого насосу циркуляції теплоносія МТА-0,5 МВт, продуктивністю $4,5 \text{ м}^3/\text{год}$ з підключенням трубопроводів гнучкими шлангами з системою «СМ-Lock»;

«D» – споживач, контур охолодження опалювальною площею 768 м^2 (контур нагріву примусової приливної вентиляції будівлі №2 ІТТФ НАНУ), сумарною ємністю 125,6 літрів теплоносія;

«Е» – джерело теплоти, контур нагріву ємністю 300 літрів теплоносія. Джерело теплоти в складі водогрійного лабораторного котла, тепловою потужністю 100 кВт та циркуляційного насоса продуктивністю $2,2 \text{ м}^3/\text{год}$. Котел призначений для теплопостачання житлових, комунально-побутових, і виробничих будівель загальною площею до 1200 м^2 , Додаток Є.

Аналіз димових газів проводився за допомогою газоаналізатора Eurotron (Ecolaine-4000) та rbr - Ecom KD. Пальник, що застосовується в ході досліджень – Golling (Німеччини) потужністю від 57 до 142 кВт з витратою рідкого палива в межах - від 4,8 до 12 кг/год.

рамка керування – складається з двох хрестовин з шаровими кранами розташованих ексцентрично відносно центральної засувки труби зворотного руху теплоносія джерела теплоти та має підключення до контуру «D» та контуру «C».



7.2.14. Схема підключення до споживача та джерела тепла прототипу МТА-0,5МВт

А – схема паралельного з'єднання теплових акумуляторів МТА, В – схема послідовного з'єднання теплових акумуляторів МТА, С – схема циркуляції теплоносія МТА, D – контур охолодження (споживач), E – контур опалення (джерело).

Заряджання мобільного теплового акумулятору МТА-0,5МВт

При зарядці мобільного теплового акумулятору циркуляція теплоносія відбувається між контурами джерела нагріву **E** та циркуляційним контуром

МТА-0,5МВт С, з перемінним (або одночасним) живленням контурів паралельного А та послідовного з'єднання В ТА ємнісного типу секції акумуляції. Контур споживача Д при цьому відключено, оскільки відбувається процес зарядки акумуляційної секції, рис.7.2.14. При цьому лінія теплоносія, що подає гарячий теплоносій приєднується до зворотного трубопроводу контуру С. Нагрітий котлом теплоносій подається по чергово або паралельно в контури паралельного А та послідовного В з'єднання ємнісних ТА безпосередньо через байпас (bypass) пластинчатого теплообмінного апарата встановленого в гідравлічній секції ІТП. Циркуляцію теплоносія (води) контурів до споживача Е та секції акумуляції А і В, здійснює насосне обладнання встановлене в ІТП. Гарячий теплоносій подається в контур споживача Е через байпас насосу контуру циркуляції С, однак насос контуру С при цьому відключено. За необхідності насос контуру С включається в роботу, після перекриття байпасу. Швидкість руху теплоносія контурів паралельного А та послідовного з'єднань В, регулюється перемикачами в процесі проведення досліджень. Результати роботи МТА-0,5МВт фіксуються в робочому журналі і виводяться на екран монітору ПК. Швидкість насосів контурів Е, С постійна в ході роботи не регулюється. Паспортні дані насосного обладнання наведено у Додатку Е паспорту ІТП [219].

Розрядка мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт

Завершивши цикл зарядки від МТА від'єднуються гнучкі шланги з швидко-роз'ємними з'єднаннями, та приєднуються для подачі до зворотного «рукава» контуру циркуляції С, а шланг зворотної води - до подаючої лінії контуру С. Тобто контур циркуляції теплоносія змінює напрямок руху.

Контур джерела живлення Е зупиняється. На рамці керування за допомогою перемикачів відкривається рух теплоносія між контурами циркуляції С та споживача Д, починається розрядка МТА. Циркуляція

проводиться за допомогою насосу контуру циркуляції С. Напір і тиск в системі циркуляції МТА регулюється зміною положення двоходового балансувального крану на «bypass» насоса контуру циркуляції С. Робочий тиск теплоносія в контурах паралельного А та послідовного В з'єднань МТА-0,5МВт регулюється двоходовим балансувальним краном встановленим на «bypass» між ними. Розрядка МТА-0,5МВт здійснюється через пластинчатий теплообмінний апарат встановлений в ІТП. Вказаний теплообмінний апарат вирівнює графік розрядки між контуром циркуляції С та контуром споживача D [219].

Після завершення циклу розрядки МТА-0,5МВт, змінивши положення кранів на рамці керування і шлангів, починається заряджання акумулятору. Процес повторюється в зворотному порядку. Необхідно зазначити що, весь час відбувається фіксація і моніторинг даних – теплопродуктивності, температури контурів циркуляції теплоносіїв та тиску в системі МТА дати і часу [219].

7.3. Визначення параметрів роботи дослідного зразка мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт

7.3.1. Теплове навантаження мобільного теплового акумулятору МТА-0,5МВт

7.3.1.1. Швидкість заряду та розряду теплового акумулятору МТА-0,5МВт

Розрахунок швидкості заряду і розряду ТА ємнісного типу в залежності від об'єму теплоакumuлюючої рідини, представлено у п. 7.1. Розрахункові значення часу зарядки в залежності від температури джерела, представлено на рис. 7.3.1. Так при температурі теплоносія, що подається від джерела живлення

100°C, зарядка МТА-0,5МВт здійснюється протягом 3 годин. При температурі теплоносія 70°C – протягом 6 годин.

Експериментальні дані процесу зарядження дослідного зразка МТА-0,5МВт представлено на рис. 7.3.2. Чим вище температура теплоносія, що подається від джерела заряджання, тим швидше здійснюється процес завантаження мобільного теплового акумулятору. На рис. 7.3.2 представлено фото монітору ПК роботи мікропроцесорного пристрою TRITON 6004ТС. Відбувається заряджання МТА-0,5МВт. Температура Т1 гарячого теплоносія подається в акумуляційну секцію від джерела нагріву до моменту співпадіння з температурою Т2. Холодний теплоносій Т2 рухається від акумуляційної секції до джерела нагріву. Час коли Т1 і Т2 співпадають свідчить про повний заряд мобільного теплового акумулятору. Процес заряджання завершено.

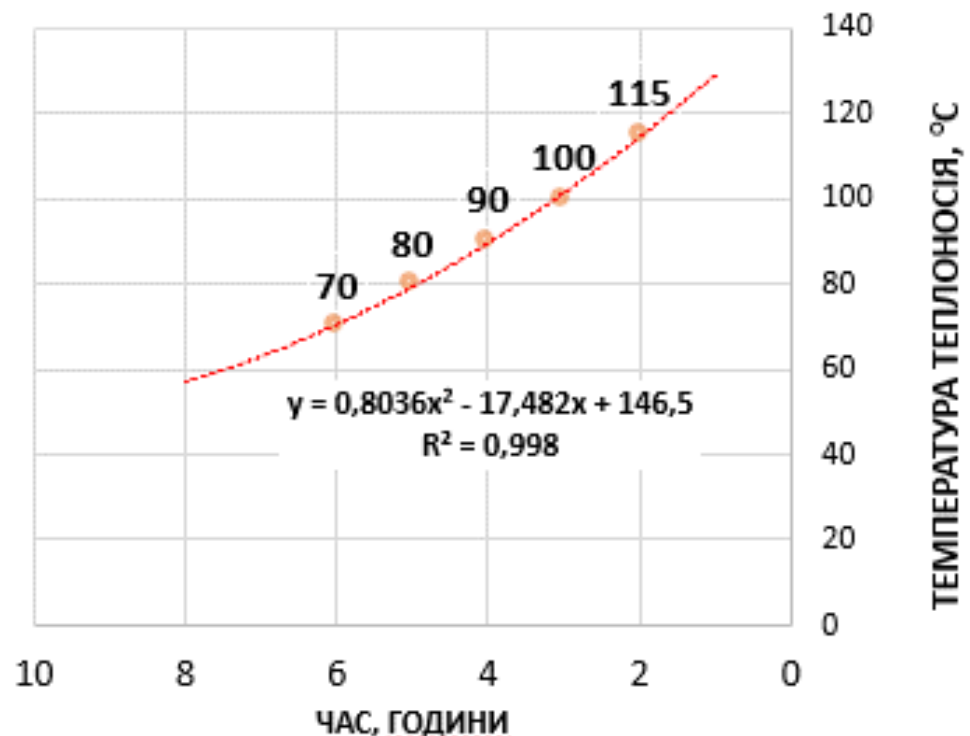


Рис. 7.3.1. Час зарядки МТА-0,5 МВт, в залежності від температури теплоносія джерелом 100 кВт, (12,0 тон ТАМ до 90 °C).

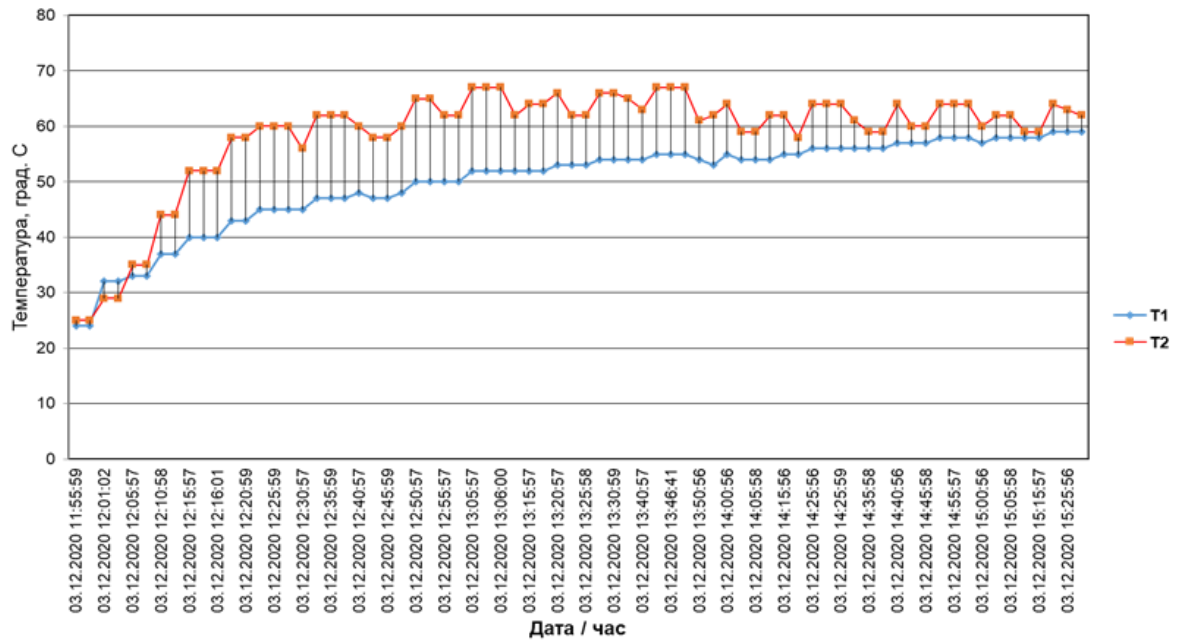


Рис. 7.3.2. Експериментальні дослідження процесу заряджання МТА-0,5МВт (грудень 2020).

Процес розрядки МТА-0,5МВт отримано експериментальним шляхом. Необхідно відмітити, що в процесі «простоя» температура в МТА фактично не змінюється, а розрядка триває протягом 10...12 годин, рис. 7.3.3.

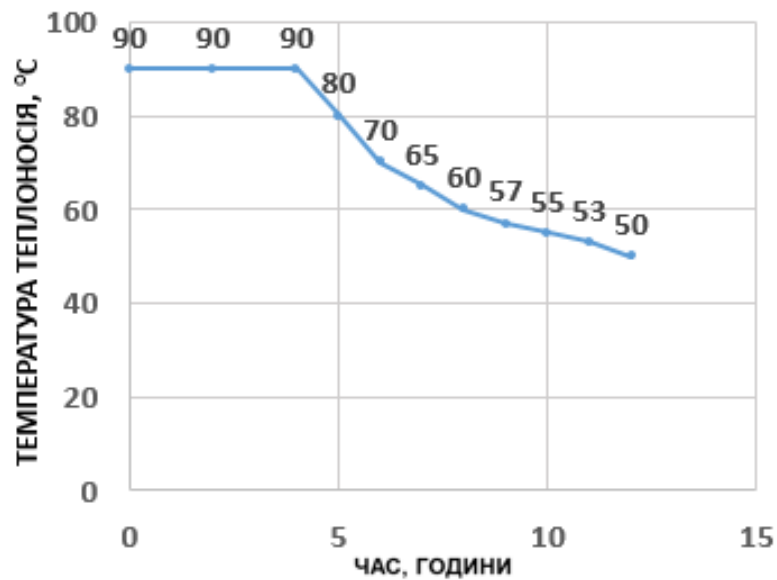


Рис. 7.3.3. Час розрядки МТА-0,5 МВт, в залежності від температури теплоносія (споживач 0,1 МВт·год).

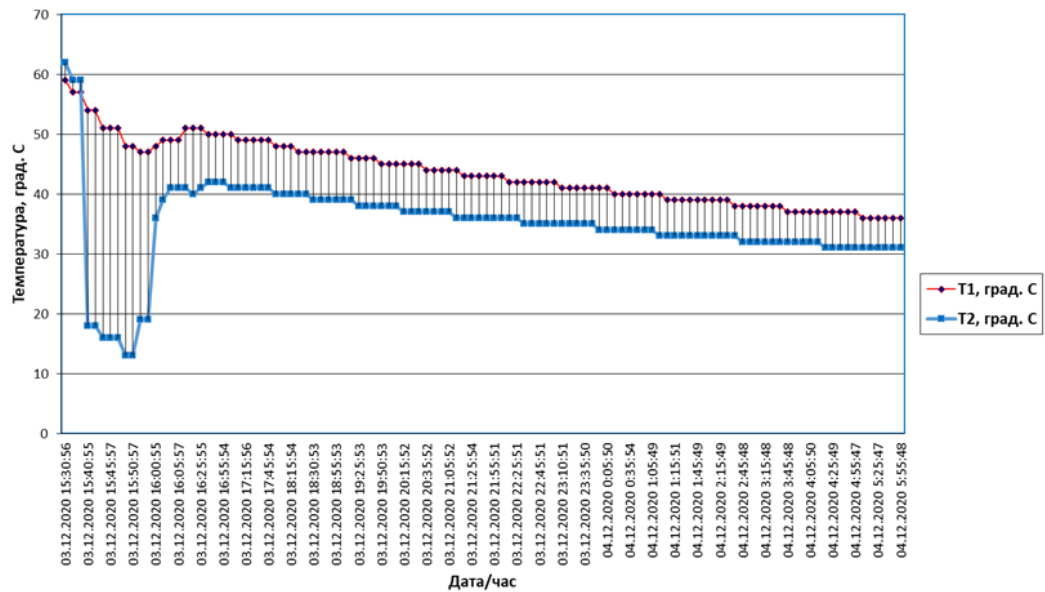


Рис. 7.3.4 Експериментальні дослідження процесу розрядки МТА-0,5МВт (грудень 2020).

Фото екрану монітору ПК в момент розрядки МТА-0,5МВт представлено на рис.7.3.4. Температура Т1 рухається від акумуляційної секції МТА-0,5МВт до споживача. Т2 –холодний теплоносій, момент наближення ліній Т1 і Т2 свідчить про повний розряд мобільного теплового акумулятору. З рисунку видно, що є тимчасове падіння температури Т2 з подальшою стабілізацією, наявність від’ємного піку свідчить про вхід холодного теплоносія в акумуляційну секцію МТА-0,5МВт.

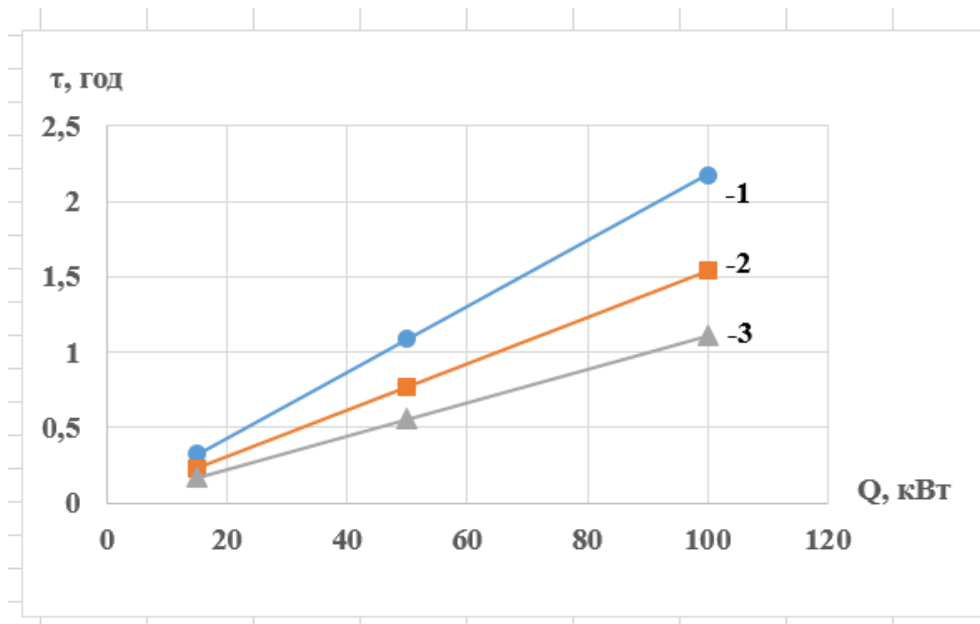
7.3.1.2. Розрахунок теплового навантаження системи акумуляції

Розрахунок теплового навантаження зарядки і розрядки проводили за методикою представленою в [223]. В основу якого покладено розрахунок за тепловим навантаженням

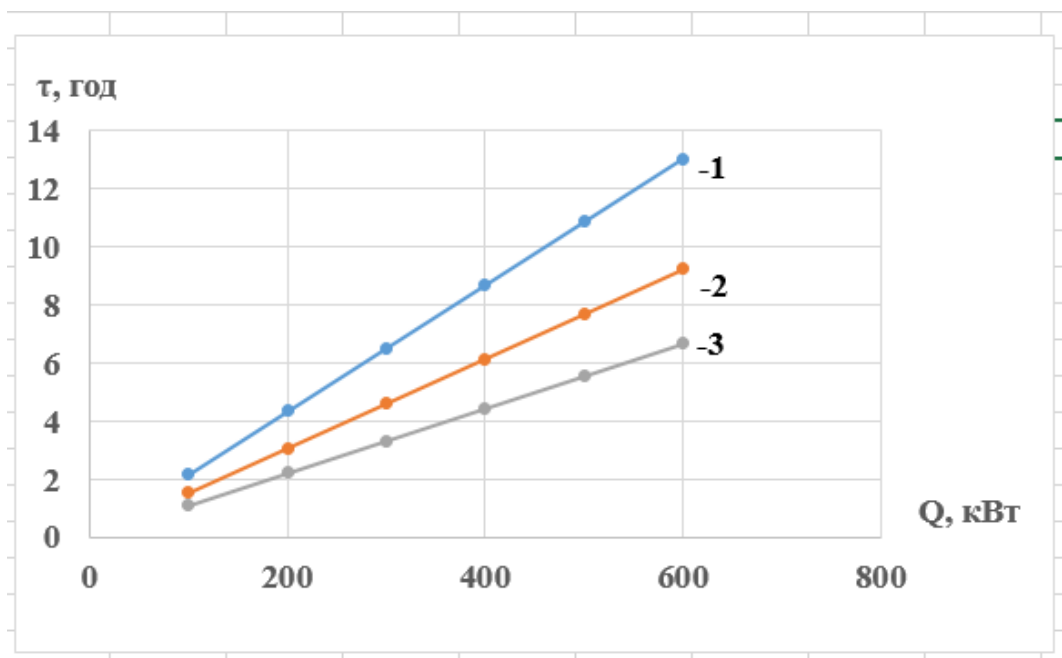
$$Q = G \cdot c_p \cdot \Delta T \text{ кВт.} \quad (7.3.1)$$

де, G – витрата теплоносія, кг/с; C_p – теплоємність теплоакumuлюючої рідини, кДж/кг·К. ΔT – різниця температур, К.

Теплоємність теплоакumuлюючої рідини приймалась відповідно до досліджень предсталених в п.4.2.2., рис. 4.2.9. даної дисертаційної роботи. Величина різниці температур відповідає температурному діапазону реальної роботи мобільного теплового акумулятораа МТА-0,5МВт і знаходиться в межах від 30°C до 90 °C. Розрахунок проводили за допомогою програми Excel. Результати розрахунку процесу заряджання проводили для об'єму однієї ємності та загального об'єму МТА-0,5МВт, рис. 7.3.4. Розрахунки процесу розрядки представлені на рис. 7.3.5.

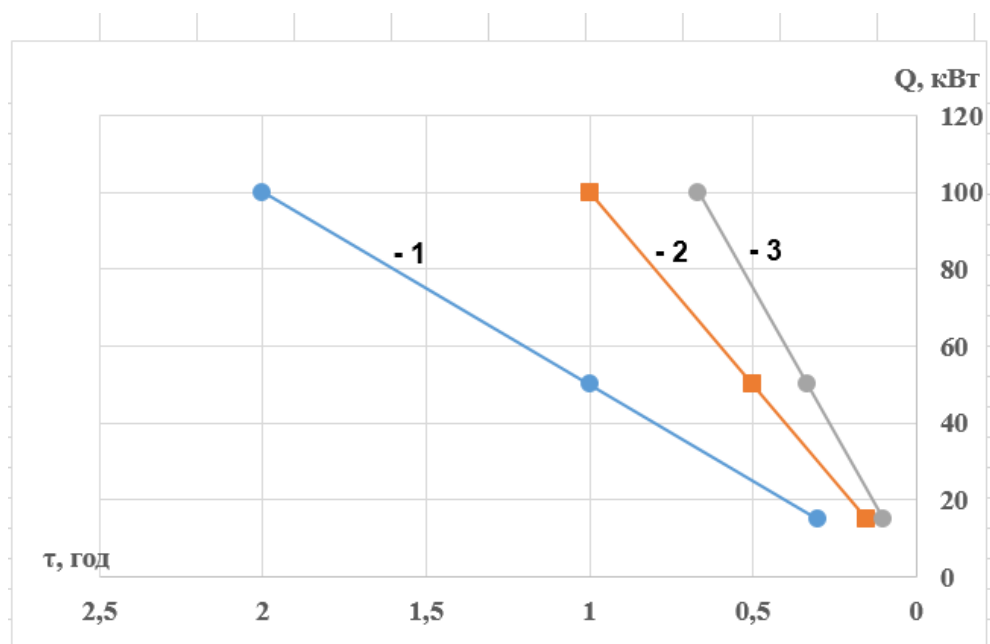


а)



б)

Рис. 7.3.5. Розрахункові дослідження процесу зарядки МТА-0,5МВт
а) однією ємності ТА 1,4 м³; б) сумарний об'єм ємностей МТА 10м³.



а)

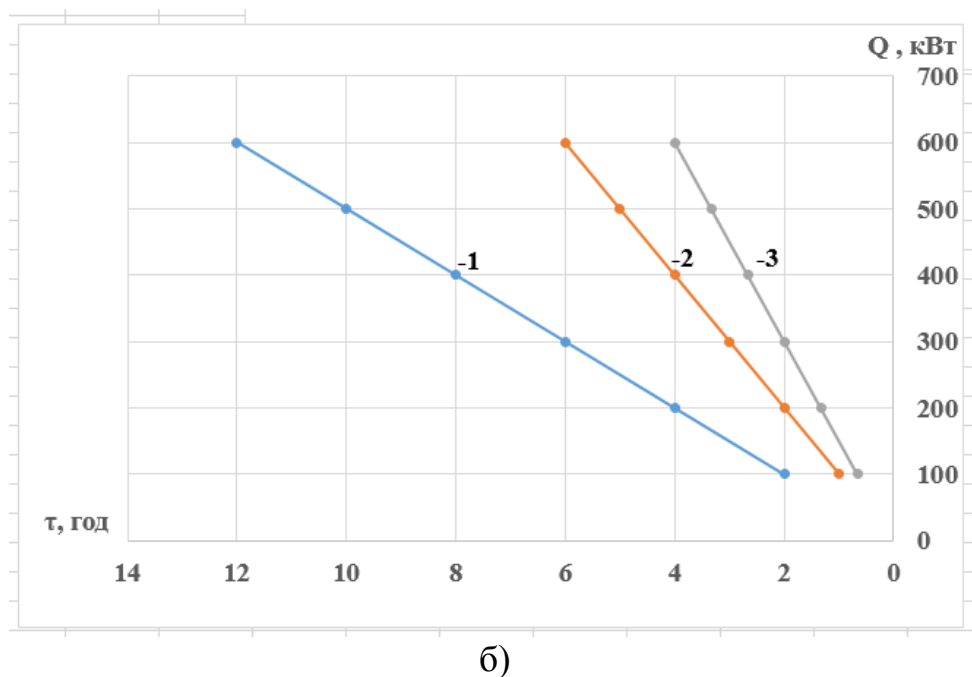


Рис. 7.3.6. Розрахункові дослідження процесу розрядки МТА-0,5МВт:
а) однією ємності ТА $1,4 \text{ м}^3$; б) сумарний об'єм ємностей 10 м^3 .

В результаті проведеного розрахунку, можна зауважити, що розрахункові значення при заряджанні співпадають у значній мірі з результатами експериментальних натурних випробувань дослідного зразка мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт, представлених в наступному пункті даної роботи. Однак при розрахункових дослідженнях не враховано вихід на стабільний режим роботи джерела живлення котла потужністю 100кВт, який було застосовано.

При співставленні результатів процесу розряджання є також досить висока степінь узгоджуваності отриманих результатів при сумарному об'ємі дослідного зразка МТА-0,5МВт, що свідчить про адекватність проведеного розрахунку.

7.3.2. Дослідження акумуляційної здатності мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт

При проведенні натурного випробування дослідного зразка МТА-0,5МВт температура зовнішнього повітря в Києві за даним сайту [«gismeteo.ua»](http://gismeteo.ua) становила близько 0°C, таблиці 7.4.

Таблиця 7.4. Температурний режим під час проведення досліджень, м. Київ

Місяць	Листопад 2020 р.						Грудень 2020 р.										
Дата	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Температура день, °С	3	2	2	2	2	2	0	0	1	2	0	-4	-4	-4	-4	-1	2
Температура ніч, °С	0	0	0	1	1	0	-3	-2	-4	-1	-4	-6	-9	-9	-6	-5	-2

В процесі досліджень проводили вимірювання:

- температур за допомогою приладу для реєстрації температур TRITON 6004ТС з комутаційним модулем TRITON С37. Схема розміщення датчиків температури і вимірювального обладнання МТА-0,5 МВт загалом, наведено на рис. 7.2.13. Цілодобовий дистанційний моніторинг температури в циркуляційному контурі С забезпечується GSM-контролером «ОКО-PRO-X»;
- кількість теплової енергії поданої на заряджання секції акумуляції та витрата теплоносія - лічильником теплової енергії МТХ 1А10.DF.2LO-YD4;
- спожита електрична енергія вимірюється наявним лічильником електроенергії;
- тиск, температури і витрати теплоносія та електрична енергія контролюється візуально в секції ІТП [231,232].

Експериментальне дослідження процесу зарядки / розрядки МТА. Температура теплоносія рівномірно підвищується. Температурний діапазон

теплоносія від джерела живлення під час випробувань, умовно розділений на однакові інтервали для встановлення в системі живлення рівноважного стану температур подаючого T_1 та зворотного T_2 трубопроводів. Діапазон температури теплоносія в межах від $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, тривалість кожного інтервалу – 25 хв. При розрядці МТА робочий діапазон температур і крок зберігається, однак вимірювання відбуваються у напрямку від $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, сенс теплоносія змінюється: T_1 гарячий від МТА до споживача; T_2 –холодний від споживача до акумуляційної секції МТА. Детальна інформація стосовно проведення експерименту представлена у Додатку Ж «ПРОТОКОЛ № 1/ДЗ-80/2019 випробувань мобільного теплового акумулятора контейнерного типу».

Візуалізація досліджень роботи МТА-0,5МВт представлена на рис. 7.3.4, 7.3.7 – 7.3.9., це скріншоти монітору ПК який з'єднаний з автоматичним цифровим перетворювачем TRITON 6004TC.

На рисунку 7.3.7. приведені результати зміни температур подачі T_1 та зворотної води T_2 контуру циркуляції **С**. Дослідження тривали протягом 7 днів з 24 по 30 листопада. Температура оточуючого середовища у цей період представлена у таблиці 7.4. Живлення МТА-0,5МВт відбувалось від контуру живлення джерела **Е** протягом 7 год. 3 хв. (з 9.00 до 16.25, 25 листопада). На нагрів МТА-0,5МВт витрачено 314,4 кВт теплової енергії [231,232].

В контурі циркуляції **С** початкова температура теплоносія близько 40°C . До 7.30 26 листопада МТА-0,5МВт розряджався, в цей період на контур споживача **Д** було відібрано 78,3 кВт теплової енергії. Це можна пояснити не достатнім розігрівом ємностей ТА, а саме - «теплового ядра» де відбувається фазовий перехід. Наступне заряджання МТА-0,5МВт було проведено з 7.40 26 листопада та тривало 11 год. Температура в ємностях ТА досягла рівня $75\text{-}80^{\circ}\text{C}$, на заряджання акумуляційної секції було витрачено 230 кВт теплової енергії.

Отже, загалом на живлення МТА-0,5МВт витрачено 544,4 кВт теплової енергії ($\eta_{ак} = 0,54$) [231,232].

Розрядка МТА-0,5МВт почалась 26 листопада з 18.50 (через 30 хв. після зупинки заряджання) контур джерела **Е** зупинено. Підключено контур споживача **Д**, циркуляція гарячого теплоносія відбувається контурам паралельного **А** і послідовного з'єднань **В** секції акумуляції. Станом на 9.30 27 листопада будівля споживача (корпус №4 ІТТФ НАНУ, м. Київ вул. М. Каніст 2а) оплювалася МТА-0,5МВт. За 15 годин розрядки споживачу було передано 2349 кВт (157 кВт/год) теплової енергії. Температура повітря 0 °С, температура в приміщеннях будівлі корпусу №4 підтримувалася на рівні 18 °С [231,232].

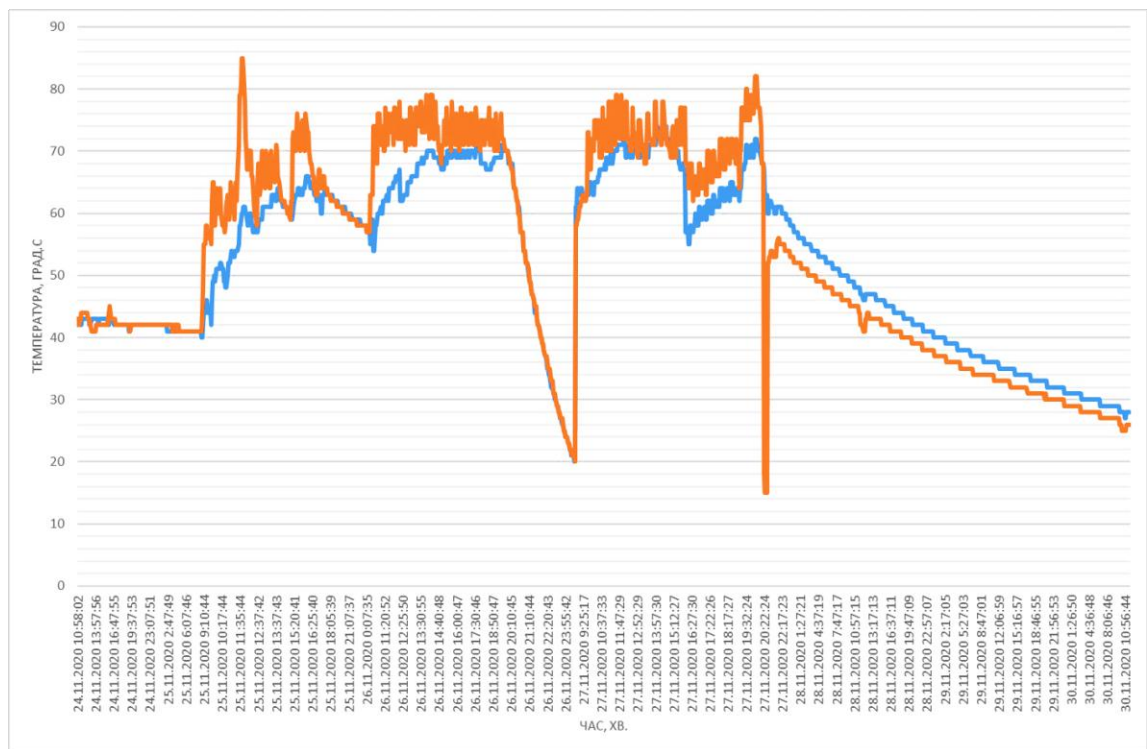


Рис. 7.3.7. Дослідження роботи мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт в період 24 по 30 листопада 2020 [231,232].

О 9.30 27 листопада розрядку МТА-0,5МВт припинено, контуру споживача відключено **Д**. Почалось заряджання МТА-0,5МВт, включено контур

джерела **Е**, яке тривало протягом 10 год. 30 хв. На заряджання було витрачено 523,35 кВт теплової енергії, потім контур джерела **Е** було від'єднано від МАТ-0,5МВт та заживлено контур споживача **Д**. Почався процес розряджання МТА, який тривав до 11.00 30 листопада. Температура теплоакumuлюючої рідини в ємностях ТА становила 80 °С. Температура теплоносія в контурі циркуляції **С** знизилась з 80 °С до 28 °С. Температура оточуючого середовища під час експерименту - близько 0 °С, температура в приміщеннях споживача - 18 °С. Отже, за 63 години роботи МТА-0,5МВт було передано споживачу 2,07 МВт теплової енергії (330 кВт/год), а $\eta_{ак} = 0,256$ [231,232].

На рис.7.3.7 різке зниження температури теплоносія о 20.27 27.11.2020 з 80 °С до 30 °С з подальшим підвищенням до 54 °С на зворотному трубопроводі, що рухається від споживача **Д**. Це пояснюється тим, що в контурі споживача циркуляція теплоносія була відсутня протягом 10 год. 30 хв. і температура теплоносія за цей час знизилась до 10 °С.

Інші піки температури теплоносія, які є на графіку рис. 7.3.7. зокрема 27 листопада пов'язані з технологічними перемиканнями та наладкою джерела живлення контуру **Е**, контурів паралельного **А** і послідовного з'єднання **В** в секції акумуляції та балансувального крана, який встановлений між ними [231,232].

Результати подальших випробувань МТА-0,5МВт проведених у період пониження температури оточуючого середовища, представлено на рис. 7.3.8. і 7.3.2.

Під час досліджень стандартної роботи МТА-0,5МВт з 12.00 3 листопада до 12.00 4 листопада, початкова температура теплоносія у контурі циркуляції була 25 °С, після підключення контуру джерела живлення **Е**, відбувається планомірний нагрів ємностей ТА контуру паралельного з'єднання **А**. Контури послідовного з'єднання **В** та контур споживача **Д** було відключено з

технологічних міркувань. Нагрів ємностей ТА проводили через пластинчатий теплообмінний апарат встановлений у ІТП, а не через байпас як у попередніх дослідженнях [231,232].

Заряджання чотирьох ємностей ТА контуру паралельного з'єднання **A** тривав протягом 3 год. 30 хв. до 15.30 3 грудня, було витрачено 366 кВт теплової енергії.

Потім, контур джерела живлення **E** зупинено. Включено контур споживача **D** почався процес розрядки МТА-0,5МВт (а саме 4 ємностей контуру **A**), який тривав близько 20 год. до 12.00 4 грудня. За цей період температура в ємностях ТА контуру **A** знизилась з 64 °С до 36 °С, а споживачу було віддано 1046,7 кВт теплової енергії ($\eta_{ак} = 0,32$). Потрібно зауважити, при паралельному з'єднанні ємностей ТА, тепла продуктивність склала майже половину від загальної теплопродуктивності МТА-0,5МВт, рис.7.3.4 [231,232].

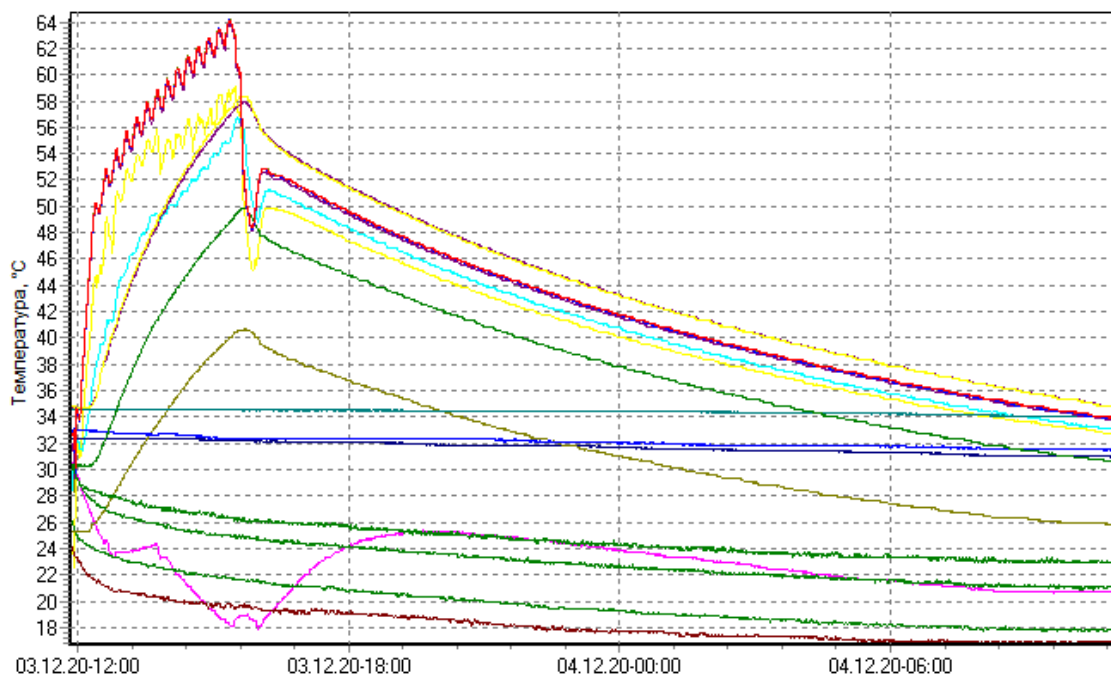


Рис. 7.3.8. Зміна температури під час заряджання МТА-0,5МВт.

Проведено дослідження імітації довготривалого зберігання теплової енергії МТА-0,5МВт при низьких температурах зовнішнього повітря, а саме розрядка МТА з включеними контурами паралельного **А**, послідовного з'єднань **В** в секції акумуляції і контур циркуляції **С** в динаміці. Результати досліджень представлено, на рис. 7.3.9. Температура повітря змінювалась в межах від 0 °С - 9 °С, таблиця 7.4.

Експеримент тривав з 11.30 4 грудня до 9 грудня 2020 року. Було зупинено циркуляцію теплоносія в контурі споживача **Д**, підключено контур паралельного з'єднання **А**, відкриті байпаси.. Система циркуляції здійснювалася насосом **С** між контуром циркуляції **С** і контуром джерела живлення **Е** . Джерело живлення - котел виключено. Система циркуляції теплоносія залишено під тиском 2,0 бар. Дренажна система закрита. Пожежо-охоронна сигналізація «ОКО-PRO-X» працювала у штатному режимі. Дистанційний моніторинг температури гарячого Т1 і холодного Т2 теплоносіїв в контурі циркуляції **С** здійснювали GSM-контролером «ОКО-PRO-X», який передбачено в МТА-0,5МВт [231,232].

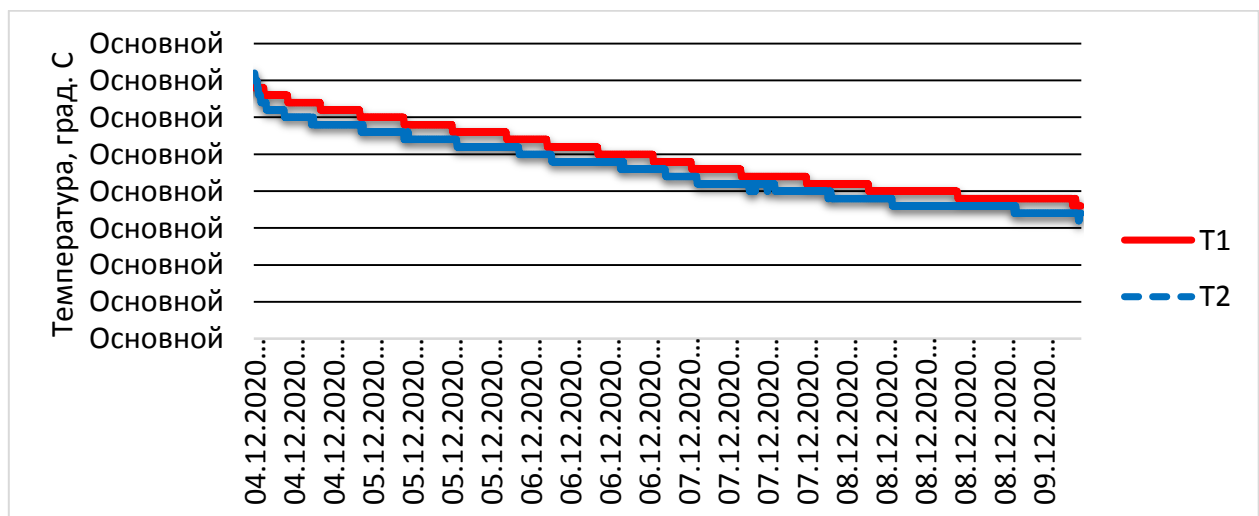


Рис. 7.3.9. Зміна температур Т1 та Т2 контуру циркуляції С в режимі довготривалого зберігання теплової енергії [231,232].

Результати експериментального дослідження режиму довготривалого зберігання теплової енергії представлено на рис.7.3.9. Отримані дані візуально підтверджують, можливість зберігання МТА-0,5МВт на відкритих площадках за від'ємних температур, за умови забезпечення циркуляції теплоносія контурів паралельного А, послідовного В з'єднання ТА і контуру циркуляції С між ними. У випадку неможливості забезпечення циркуляції теплоносія в системі МТА-0,5МВт, воду потрібно злити відповідно до опису в конструкторській документації.

7.3.3. Визначення теплових втрат дослідного зразка мобільного теплового акумулятору МТА-0,5МВт

Важливим параметром при тепловому акумуляуванні, а особливо при його транспортуванні є теплові втрати що виникають під час процесу. Тому було проведено розрахункові і експериментальні дослідження для визначення можливих величин.

Проведено розрахунок теплових втрат МТА-0,5МВт через корпус з урахуванням реального робочого діапазону температур в середині теплових акумуляторів ємнісного типу в межах від 30 до 90 °С. В першому випадку розрахунок проводили з припущенням, що у теплоакумуляуючих ємностях вода, рис. 7.3.10.

Другий розрахунок враховував застосування створеної теплоакумуляуючої рідини, рис. 7.3.11. В результаті було встановлено, що в цьому випадку значення втрат зменшуються, що підтверджується експериментальними даними, рис.7.3.12.

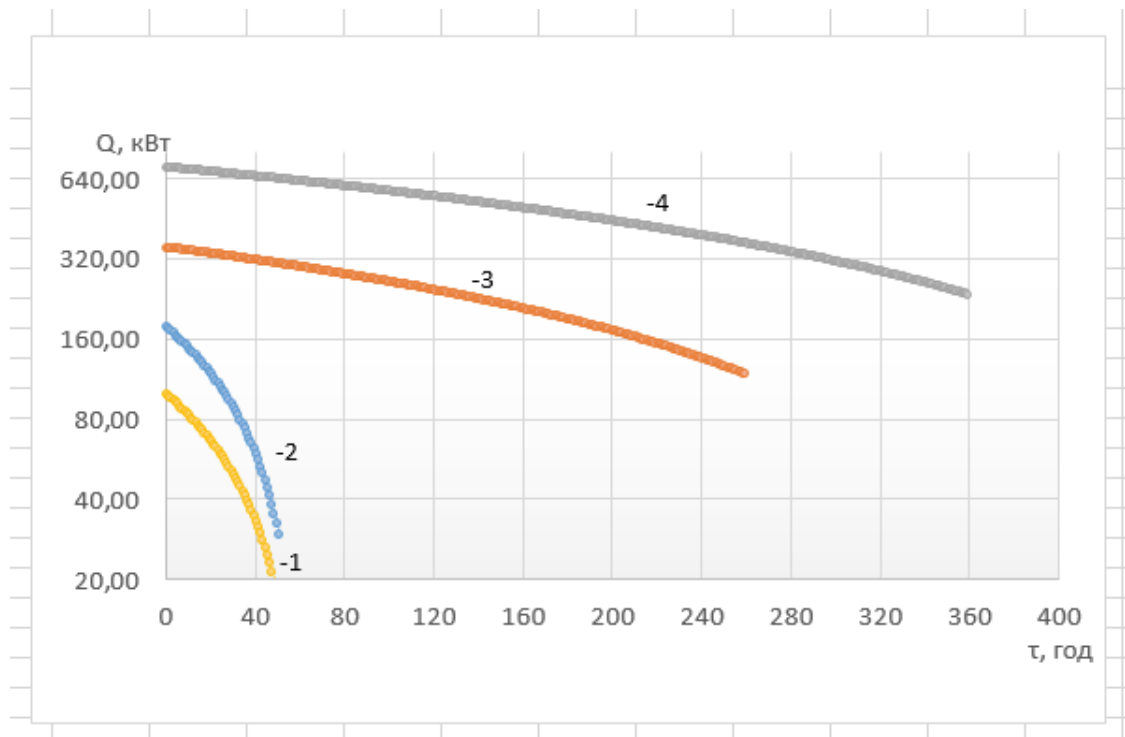


Рис. 7.3.10. Розрахункова залежність теплових втрат МТА-0,5МВт від об'єму ємності теплоакumuлюючої рідини (вода): 1 – $1,4\text{ м}^3$; 2 – $2,5\text{ м}^3$; 3 – 5 м^3 ; 4 – 10 м^3 .

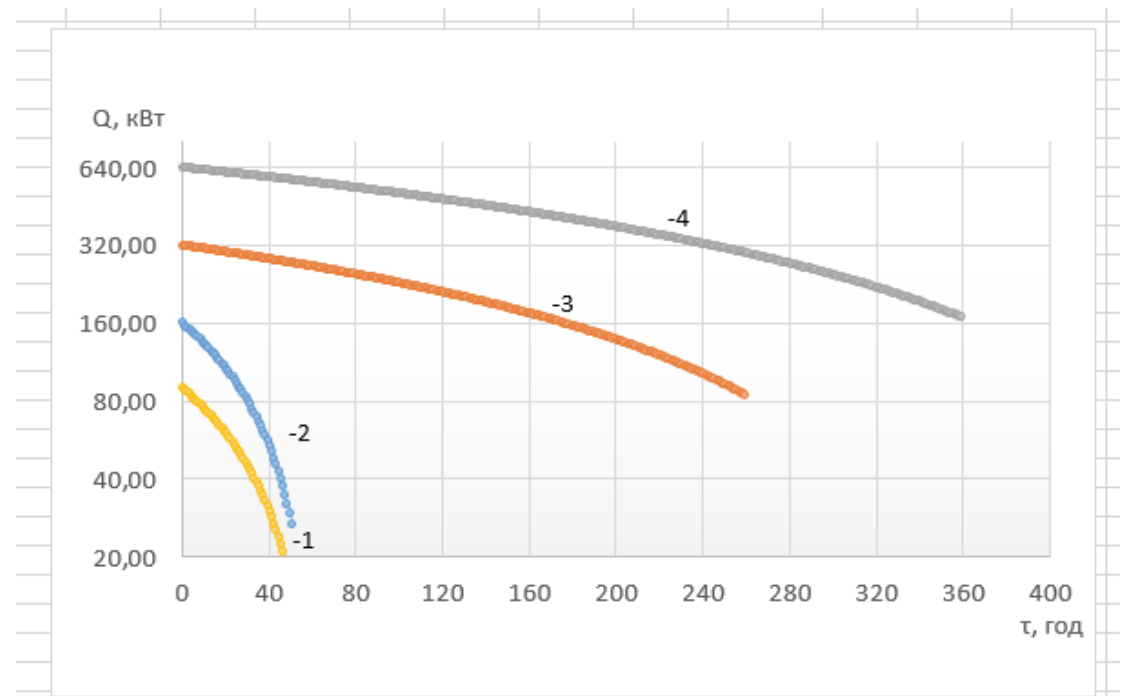


Рис.7.3.11. Розрахункова залежність теплових втрат МТА-0,5МВт від об'єму ємності теплоакumuлюючої рідини (створена теплоакumuлююча рідина):
1 – $1,4\text{ м}^3$; 2 – $2,5\text{ м}^3$; 3 – 5 м^3 ; 4 – 10 м^3 .

Для запобігання теплових втрат в конструкції дослідного зразка було вжито заходів – весь об'єм секції акумуляції заповнили заливним пінополіуретаном Elastopor H 1701/9 щільністю 10кг/м^3 , марки Elastospray який призначений для термоізоляції великих об'ємів. Також додатково секції в місцях встановлення оглядових ролетів встановлено панелі з деревин та шар відбиваючого утеплювача.

Після застосування проведених заходів було проведено перевірку якості теплової ізоляції через огорожувальну конструкцію дослідного зразка МТА-0,5МВт. Виконано розрахунок теплових втрат, а також експериментальне дослідження з візуалізацією зображення за допомогою тепловізору Ti-160 та пірометру СЕМ DT-8867Н, у нічний час при температури $-1,0^{\circ}\text{C}$.

На рис. 7.3.12 наведені дослідження теплових втрат МТА-0,5МВт з відключеними контурами паралельного **A** та послідовного **B** з'єднань секції акумуляції і системи циркуляції теплоносія **C** з метою імітація транспортування МТА-0,5МВт на велику відстань. Температура оточуючого середовища під час досліджень близько 0°C , таблиця 7.4.

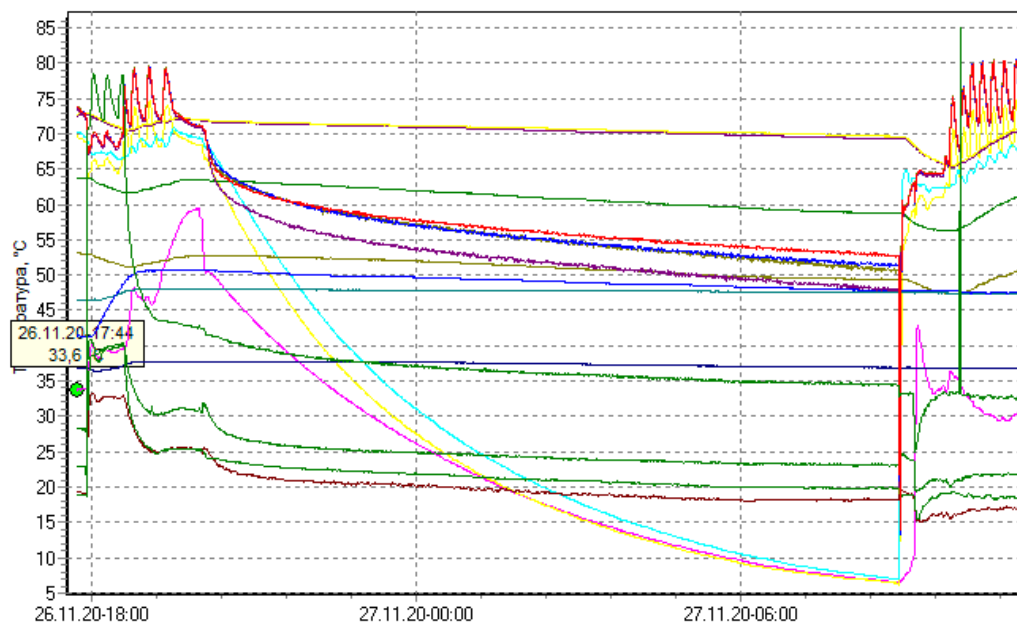


Рис. 7.3.12 Дослідження тепловтрат при транспортуванні мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт [231,232].

Початкова температура теплових акумуляторів ємнісного типу в секції акумуляції о 18.00 27 листопада 72 °С. Через 13 годин імітації транспортування МТА-0,5МВт о 12.00 28 листопада температура ємнісних в ТА зменшилася на 1,0 °С. Отже, натурні випробування теплової ізоляції МТА-0,5МВт свідчать про достатній рівень ізоляційного матеріалу в секції акумуляції та про доцільність застосування МТА-0,5МВт за низьких температур.

Експериментальні дослідження допомогою тепловізору Тi-160 та пірометру СЕМ DT-8867Н для візуалізації теплових втрат, представлено на рис. 7.3.13. Як видно з ілюстрації є теплові втрати у верхній частині корпусу секції акумуляції та в секції де встановлено ІТП. Отже, необхідно врахувати ці недоліки і додатково утеплити конструкцію і трубопроводи індивідуального теплового пункту.

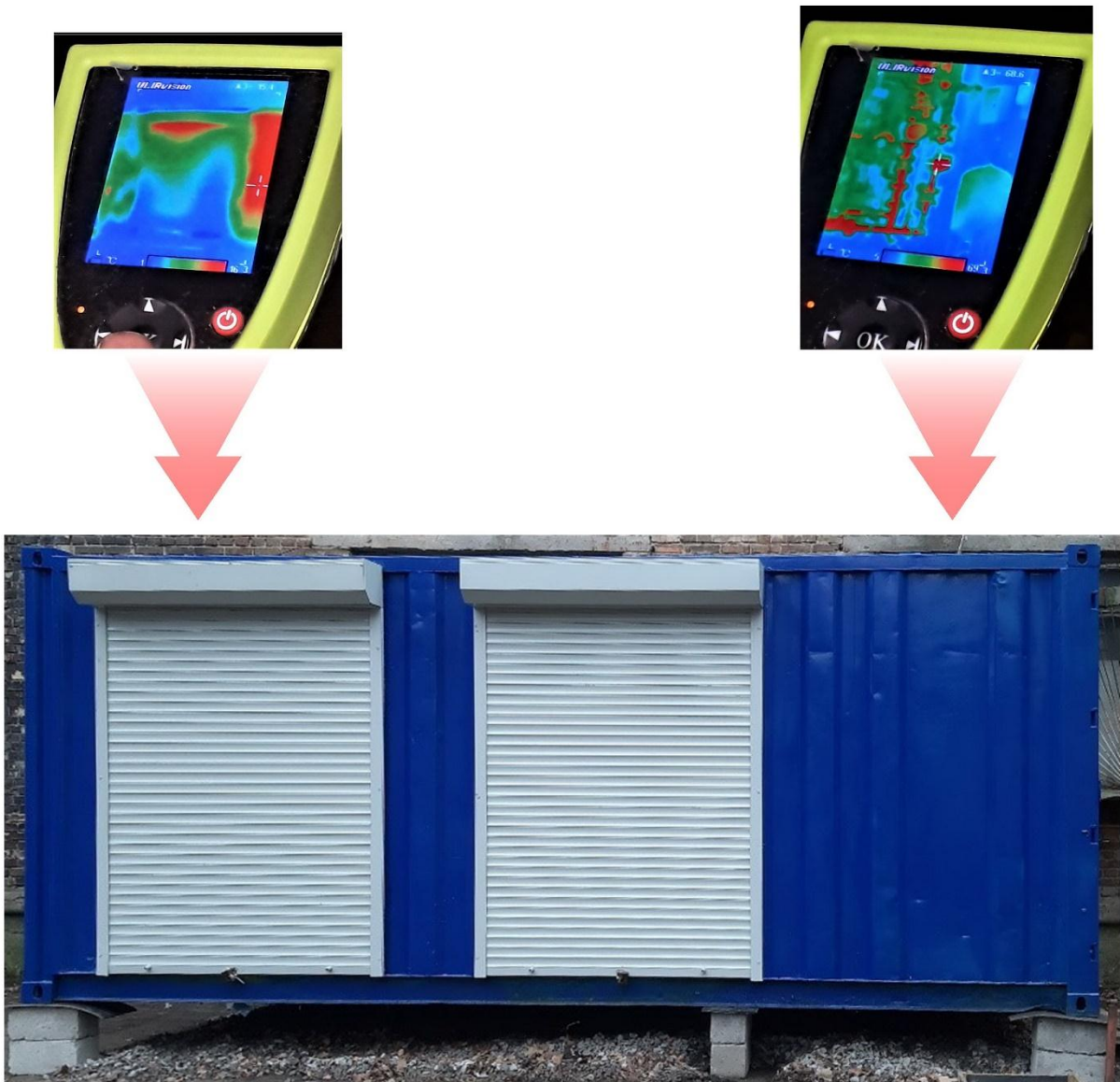


Рис. 7.3.13. Тепловізійна зйомка конструкції мобільного теплового акумулятора контейнерного типу МТА-0,5МВт.

Червоні зон на рис. 7.3.13. є в місцях акумуляційної секції, де очевидно є порожнини не заповнені пінополіуретаном та в секції індивідуального теплового пункту вирізняється трубопровід з гарячим теплоносієм. Для усунення вказаних недоліків необхідно вжити додаткових заходів для ізоляції трубопроводу та заповнення наявних порожнин.

7.4. Концепт дискретної системи опалення

Сучасний напрямок розвитку теплопостачання є створення і застосування обладнання та матеріалів, що забезпечують накопичення та збереження теплової енергії в ємнісних акумуляторах, огляд таких зразків представлено в розділі 1 даної дисертації.

Технології збереження низькопотенціальної теплової енергії пов'язані з використанням матеріалів природнього походження. Часто в нових конструкціях використовуються спеціально підібрані або підготовлені теплоаккумуляційні матеріали, з властивостями, що здатні відновлюватись у процесі акумулювання [6,7,10]. Особливе значення має підбір матеріалів здатних до фазового переходу та їх здатність до збереження цих властивостей в процесі рециркуляції (циклічних процесів нагріву - охолодження), спосіб і форма їх розташування у теплоакumuлюючій ємності [201-203]. Для стандартизації параметрів матеріалів з фазовим переходом розроблено нормативи, що класифікують категорії матеріалів, визначають основні робочі параметри, описують методики вимірювань [16,202].

В 2020 р. в Інституті технічної теплофізики НАН України був створений дослідний зразок мобільного теплового акумулятору МТА-0,5МВт [12,19,33], призначений для роботи в надзвичайних ситуаціях, джерелом живлення якого можуть бути доступні ВДЕ або місцеві види палива. Основним елементом МТА-0,5МВт є акумуляційна секція, що складається з 8 теплових акумуляторів ємнісного типу з оригінальною конструкцією [156]. Особливістю конструкції даного акумулятору ємнісного типу є «теплове ядро», що представляє собою вертикально встановлену по центру ємності коаксіальну трубу заповнену підібраним матеріалом з фазовим переходом 1-го роду природнього походження. Матеріал з фазовим переходом був підібраний ґрунтуючись на

результатах аналітичних розрахунків [110] та експериментальних дослідженнях [111-113]. При застосування матеріалів з фазовим переходом було використано світовий досвід розташування таких матеріалів викладений у [205,206].

Створений мобільний тепловий акумулятор МТА-0,5МВт є основою побудови концепту дискретної системи опалення. ДСО передбачає побудову гнучкої системи теплопостачання, де МТА-0,5МВт транспортується за допомогою автомобілів або будь яким доступним видом транспорту [19,33, 109].



Рис.7.4.1. Реалізація концепту дискретної системи опалення [33,109].

МТА-0,5МВт дозволяє залучити у якості джерела енергії відновлювальні джерела енергії сонця і вітру, джерела геотермальної енергетики, вторинні енергетичні ресурси у вигляді скидної теплоти підприємств або при спалюванні відходів сільськогосподарської діяльності. Також можуть бути застосовані будь які доступні місцеві види палив.

Споживачем такої дискретної системи опалення – може бути як приватний сектор, так і комунальні будівлі або військові об'єкти. Особливого значення набуває використання МТА-0,5МВт в умовах військових дій та надзвичайних ситуацій.

Безумовними перевагами застосування ДСО є [12,19,44]:

- можливість постачання теплової енергії до об'єктів критичної інфраструктури, військових об'єктів і віддалених споживачів. А також до споживачів постраждалих внаслідок військових дій та надзвичайних ситуацій;
- відмова від традиційного трубопровідного транспорту теплоносія та створення принципово нової дискретної системи опалення;
- використання МТА-0,5МВт дозволяє побудувати гнучку схему теплозабезпечення при модернізації діючих та при будівництві нових джерел тепlopостачання;
- створення нового екологічного бізнесу та конкуренції в теплоенергетичному секторі;
- залучення в енергетику місцевих видів палива, вторинних ресурсів та поновлюваних джерел енергії, рекультивація земель;
- високий рівень стандартизації та уніфікації теплового акумулятору, складові частини та обладнання переважно українського виробництва;
- зменшення непродуктивних втрат теплової енергії на різних етапах тепlopостачання є надважливим чинником [9].

Непродуктивні втрати при генерації тепла виникають – на станційному котельному обладнанні, магістральних трубопроводах та незбалансованості споживання теплової енергії [224]. Переважна частина теплових втрат при тепlopостачанні зумовлена незбалансованістю системи «генерація енергії – система постачання – споживач» і можуть сягати 30...40 %, при нормативних показниках до 15 %. Частка нормативних втрат на джерелі енергії обмежується

4 %, але на практиці даний показник складає 17...19 % [224]. Втрати теплоти при транспортуванні пов'язані зі зношеністю транспортної інфраструктури. Часті пориви, що супроводжуються витоком теплоносія та втрати через ізоляцію складають сягають 20% при нормативно дозволених 8%. Втрати на розподільчих мережах складають близько 8% при нормативно дозволених 3%. Втрати у споживача теплової енергії не нормуються, однак мають найбільше значення [224].

Втрати на станційному обладнанні при генерації енергії пов'язані переважно, з низьким ККД технічно зношеного і морально застарілого обладнання, строк експлуатації якого давно вичерпано.

Втрати на технологічному трубопроводі сягають 30%, через незадовільний стан ізоляції трубопроводів, часті пориви з втратами теплоносія та часовою корозією трубопроводів. Теплова мережа, як правило не захищена від впливу ґрунтових вод, що спричиняє ушкодження ізоляції і корозію труб, появі тріщин і протікань. Як наслідок, відбувається відключення абонентів від теплової мережі.

Втрати при розбалансуванні технологічних процесів спричинені неврегульованістю в часі генерації та споживання енергії, рис.7.4.2 і 7.4.3. Потужні джерела генерації ТЕС, АЕС генерують енергію зі стабільною потужністю, а потреба у споживача змінюється в залежності від часу доби та сезону споживання.

Менш потужні джерела генерації ВДЕ, наприклад сонця і вітру, мають нерівномірний характер генерації і викликають нерівномірне навантаження на станційне обладнання, рис.7.4.4. Одним з шляхів вирішення цієї задачі є застосування ТА різної потужності [225].

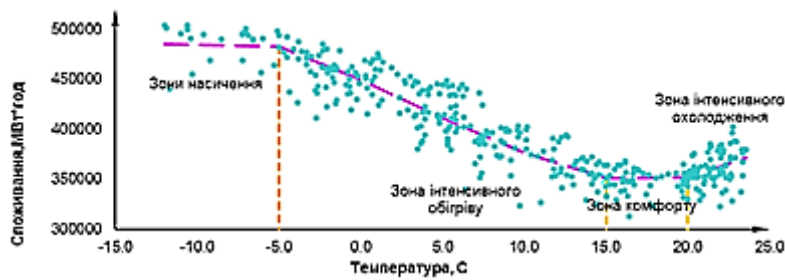


Рис.7.4.2. Типовий добовий графік навантаження енергосистеми України [226]

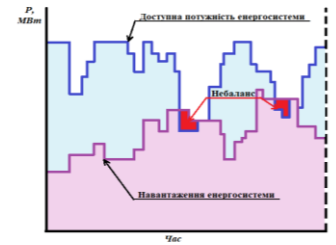
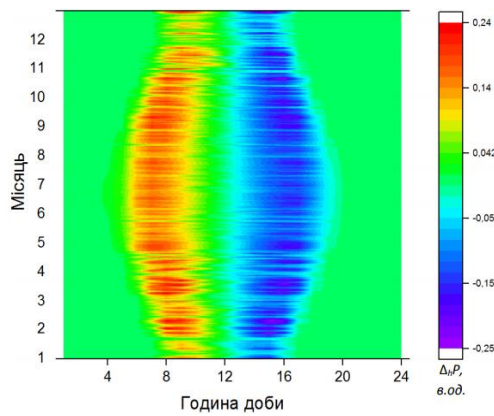
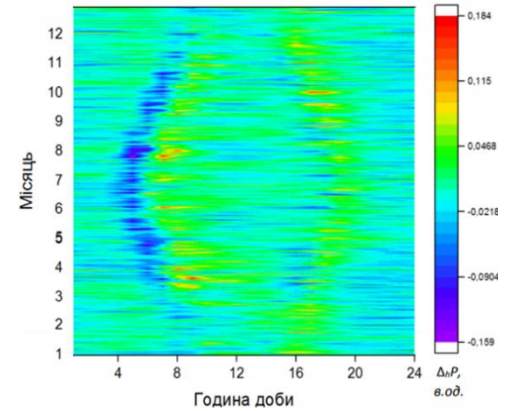


Рис.7.4.3. Пінч-аналіз доступних резервів потужності тепло-енергосистеми [225]



а)



б)

Рис. 7.4.4. Розподіл стрибків потужності, генерованої групою сонячних електростанцій СЕС (а) та вітрових електростанцій (б) [225].

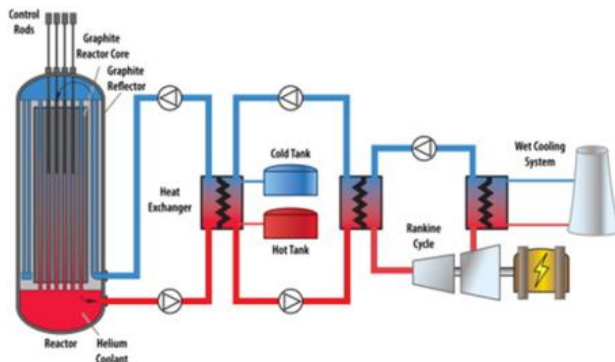


Рис. 7.4.5 Схема сумісності АЕС та ВДЕ шляхом з'єднання ТА з джерелами геерації [227]

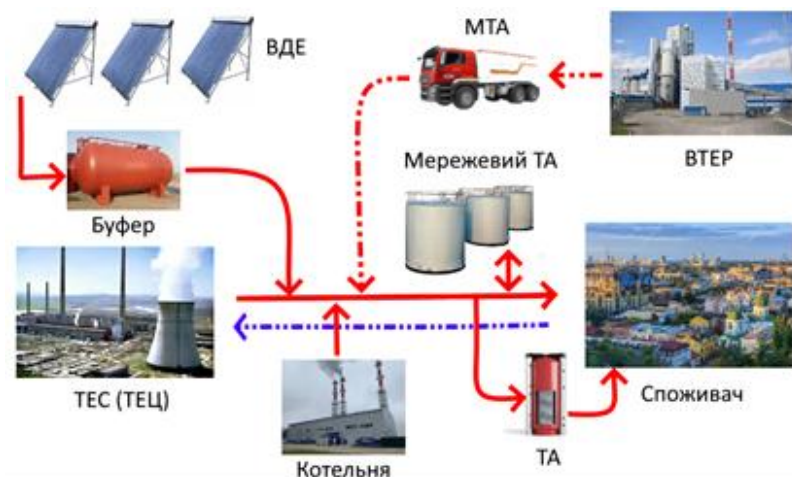


Рис. 7.4.6. Схема застосування стаціонарних та мобільних ТА [33]

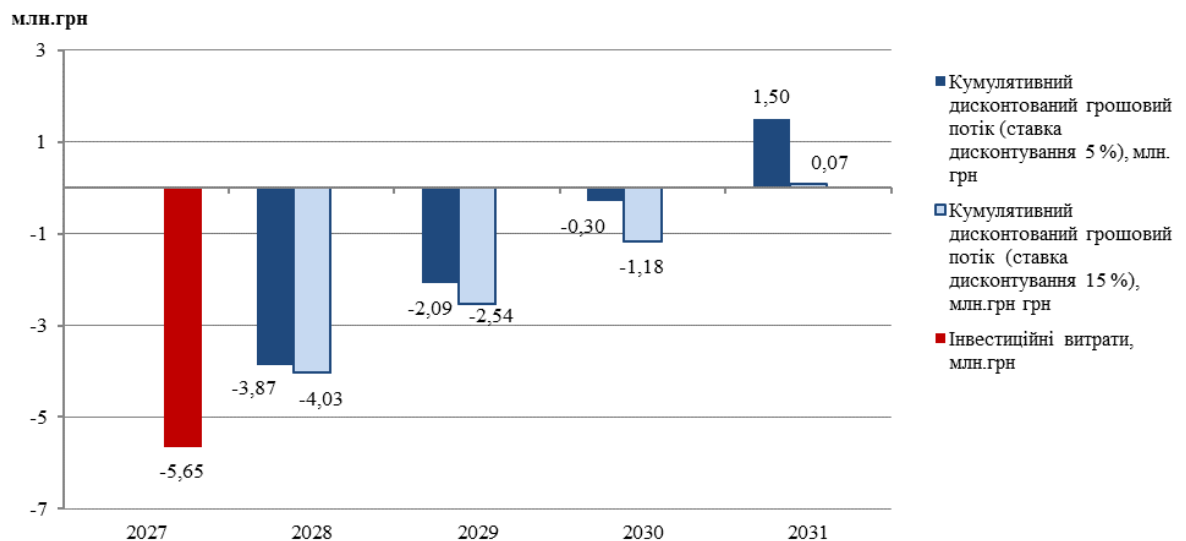
Зменшення непродуктивних теплових втрат при генерації енергії можливе при збільшенні частки ВДЕ та ВТЕР при генерації енергії, що суттєво знизить навантаження на наявне працююче обладнання. В Україні у 2020 році було збільшено виробництво електроенергії з ВДЕ в порівнянні з попереднім роком на 5,5%, а в цілому до 17% [227]. Зменшення втрат при розбалансуванні технологічних процесів при генерації, можливо, за рахунок комплексного підходу сумісного підключення джерел ВДЕ та АЕС. Отримані авторами [228] результати моделювання процесу сумісного підключення АЕС і доступних ВДЕ при залученні ТА великої потужності свідчать про доцільність оптимізації графіків навантажень, рис.7.4.5. Також можливим рішенням при розбалансуванні технологічних процесів може бути застосування систем стаціонарного та мобільного ТА [229], рис.7.4.6. Застосування ТА дозволяє вирівняти графіки навантаження, спростити процес регулювання та зменшити розхід паливно-енергетичних ресурсів та навантаження на обладнання джерела енергії, що позитивно відобразиться на її собівартості [9]. Для стабілізації графіків навантаження АЕС, ТЕС і ВДЕ доцільно застосовувати хімічні, термічні та термохімічні системи зберігання ТА, оскільки вони можуть забезпечити відповідну місткість зберігання енергії. МТА доцільно застосовувати в СЦО та для віддалених об'єктів в мирний час. Так

забезпечувати теплопостачання будь яких об'єктів в зоні надзвичайних ситуацій [230].

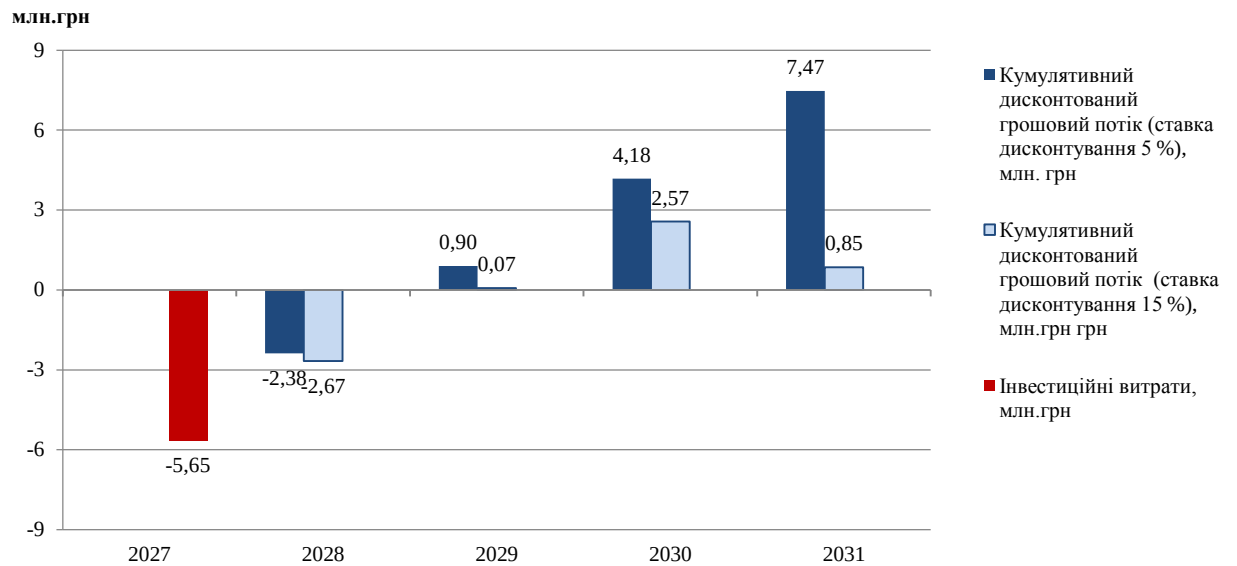
Було проведено попередній розрахунок економічної ефективності потенційного публічного інвестиційного проєкту «Створення мобільного теплового акумулятора МТА-0,5 МВт». Розрахунок інтегральних показників економічної ефективності за потенційним публічним інвестиційним проєктом «Створення мобільного теплового акумулятора МТА-0,5 МВт» було здійснено за двома сценаріями теплової потужності МТА: перший сценарій передбачав проведення розрахунків інтегральних показників економічної ефективності за проєктною тепловою потужністю мобільного теплового акумулятора 0,5 МВт, другий сценарій – за фактичною експлуатаційною тепловою потужністю мобільного теплового акумулятора 0,78 МВт. Порівняльний аналіз зазначених сценаріїв дозволяє оцінити вплив рівня використання теплової потужності мобільного теплового акумулятора на економічну ефективність, визначити межі економічної доцільності реалізації потенційного інвестиційного проєкту та обґрунтувати потенціал підвищення ефективності за рахунок оптимізації режимів роботи обладнання. Для забезпечення об'єктивності оцінювання в умовах невизначеності вартості капіталу, моделювання дисконтованих грошових потоків здійснювалося за двома ставками дисконтування: 5% (при реалізації соціального проєкту та залученні публічних інвестицій за рекомендаціями Міністерства економіки, довілля та сільського господарства України), а також 15% (залучення приватного фінансування), таблиця 7.5 і рис. 7.4.7.

Таблиця 7.5. Інтегральні показники економічної ефективності за потенційним публічним інвестиційним проєктом «Створення мобільного теплового акумулятора МТА-0,5 МВт»

Показник	Сценарій проєктної теплової потужності			
	МТА-0,5 МВт (ставка дисконтування - 5 %)	МТА-0,5 МВт (ставка дисконтування - 15 %)	МТА-0,78 МВт (ставка дисконтування - 5 %)	МТА 0,78 МВт (ставка дисконтування - 15 %)
Чиста приве- дена вартість (NPV), грн	1501783	73633	7471154	4853349
Внутрішня норма дохід- ності (IRR), %	15,4		48,4	
Дисконтова- ний період окупності, років	4,2	4,9	2,7	2,9
Дисконтована рентабельність інвестицій (ROI),%	27	1,3	132	15
Точка беззбитковості, грн	3594827		5650966	



а)



б)

Рис. 7.4.7. Динаміка руху грошових коштів у 2027-2031 роках за сценарієм проєктної теплової потужності мобільного теплового акумулятора а) 0,5МВт; б) 0,78МВт.

На основі базової конструкції МТА-0,5МВт є можливість створити конструкцію багатофункційного мобільного теплового акумулятору подвійного призначення для застосування під час бойових дій. Країни НАТО широко застосовують контейнери та укриття для підтримки оперативних та логістичних потреб армії та цивільної оборони, залучених до миротворчих операцій або гуманітарної допомоги [223,232]. Ці вироби будуються відповідно до стандартів безпеки MIL і STANAG, з сертифікатами CSC, TIR, UIC і для того, щоб їх перевозили літаком або вертольотом CH47 [233,234]. Таке обладнання розроблено для забезпечення експлуатації в районах з перепадами температур від -32°C до $+55^{\circ}\text{C}$, застосовуються як диспетчерські, біологічні лабораторії, збройові кімнати, тимчасове житло, офіси, вбиральні, душові кабінки, пральні і кухні (від 250 до 1000 страв/год), склади, холодильні кімнати, для очищення води та стічних вод, генератори електричної енергії, лікарні, лабораторії, механічні, електротехнічні, електронні цехи, обробки дерева і сталі, майстерня

технічного обслуговування транспортних засобів, зберігання та розподіл мастил, диспетчерська вежа та під спеціалізовані проєкти [235,236]. МТА-0,5МВт наразі дозволяє забезпечити тепловою енергією окремі об'єкти населених пунктів шляхом використання окремих контейнерів із теплоакумуючою речовиною [51,156], що дозволяє використовувати тепло доступних місцевих видів палива, одержаних у віддалених від споживача джерел генерації. Наразі проводяться розробки багатофункціональних мобільних акумуляторів (БТА) з метою розширення сфери їх застосування, рис.7.4.8.



Рис.7.4.8. Розширення сфери застосування трансформація МТА [231].

БТА розміщується у аналогічно МТА суховантажному контейнері, має акумуляційний та технологічний відсіки. Приєднання до споживача та джерела зарядки виконується гнучкими шлангами зі швидко-роз'ємним з'єднанням типу «Camlock», рис.7.4.9.

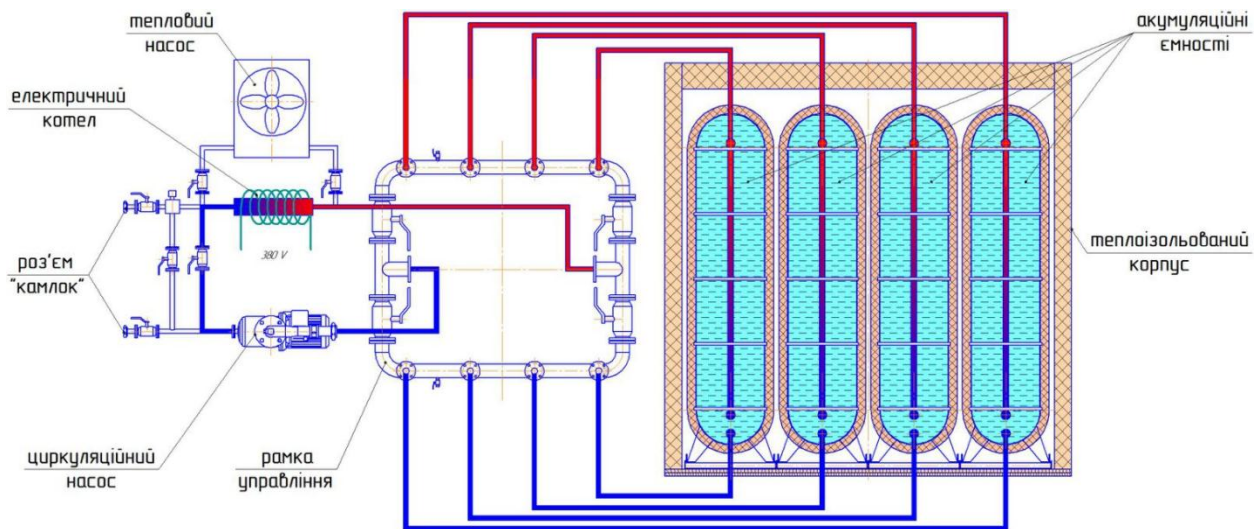


Рис. 7.4.9. Технологічна схема БТА 12/0,5МВт [231].

Використання багатфункціональних транспортабельних (мобільних) акумуляторів ємнісного типу заповнених теплоакумулюючою рідиною дозволяє розв'язувати проблеми попередньої підготовки об'єктів інженерної інфраструктури до експлуатації в умовах проведення бойових дій та надзвичайних ситуацій. Такі переформатовані МТА можуть бути використані для стабільного опалення, охолодження та автономного водопостачання опорних пунктів, фортифікаційних та полігонних споруд, військових аеродромів, вузлів зв'язку, командних пунктів тощо [231,232].

Живучість військових об'єктів залежить від їх розташування на місцевості та маскування. Одним з демаскуючих факторів життєдіяльності військ є опалення тимчасових і фортифікаційних споруд. Демаскуючим фактором є дим від печей та теплова і хімічна емісія відхідних димових газів. Дим з печі видно на відкритій місцевості на відстані до 10 км, а тепловий слід від працюючої печі на висоті до 2 км. Використання БТА дозволяє розв'язувати питання тактичного маскування військових об'єктів [231,232].

Також трансформовані МТА можуть застосовуватись в місцях виникнення надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, при

виконанні аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт, ліквідації локальних вогнищ, забезпечення водопостачання в районах радіаційного і хімічного забруднення місцевості під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, катастроф і стихійного лиха. МТА можуть використовуватись у якості пересувної ємності запасу води при пожежогасінні [231,232].

Перспективним напрямком заощадження паливно-енергетичних ресурсів є затосування теплоакумуючих матеріалів на основі водорозчинних полімерів. За оцінками експертів, в Європі потенціал енергозберігання за допомогою застосування теплових акумуляторів теплоти / холоду складає близько 1,4 млн. ГВт·год енергії на рік, що дає змогу скоротити на 400 млн. тон викиди CO₂ [171,172]. Такі TES класифікують за призначенням та температурою збереження теплової енергії. Типові параметри для систем TES показані в таблиці, включаючи потужність, ефективність, період зберігання та вартість [180,181]. Очевидно, водні розчини ВРП мають привабливу продуктивність, широкий діапазон потужності, високу ефективність та доступну вартість [171]. Питома теплоємність розчинів ВРП приблизно на 30 % вище, а інвестиційні витрати не перевищують 10 % у порівнянні зі звичайною водою.

Таблиця 7.6. Основні параметри для зберігання TES [171].

TES	Продуктивність системи TES, кВт·год/тн	Потужність, МВт	Ефективність, %	Час зберігання	Вартість періоду зберігання, €/кВт·год
Гаряча вода	10–50	0,001–10,0	50–90	днів/міс.	0,1– 10
ВРП	30 – 65	0,001–10,0	75 - 90	годин / діб	0,1 – 10
PCM	50–150	0,001–1,0	75–90	годин/міс	10 – 50
Хімічні реакції	120–250	0,01–1,0	75 – 100	рік/доба	8 –100

Висока щільність зберігання енергії і висока потужність для зарядки / розрядки є визначаючими робочими параметрами будь-якої системи зберігання. Найбільш ефективна акумуляція досягається при застосуванні теплоти фазових перетворень чи теплоти хімічних реакцій. Найменш ефективною є акумуляція при використанні тільки теплоємності речовини, зміни її ентальпії зі зміною температури без фазових перетворень [182]. Розчини ВРП створюють в об'ємі води аморфні трьохмірні структури на кшталт кристалогідратів, що пояснює ефективність їх використання [171,172].

Висновки за розділом 7

1. Створення оптимізованої конструкції теплового акумулятору ємнісного типу з двома робочими ємностями і застосуванням трьох робочих тіл – теплоакумуючої рідини, яка заповнює весь об'єм ємності ТА; матеріалу з фазовим переходом, що розташований у «тепловому ядрі» встановленому по центру ємності ТА і вода у якості теплоносія, що рухається по спіралі у «змієвиковому» теплообмінному елементі дозволили підвищити інтенсифікацію процесу теплообміну, зокрема:

- спіральний теплообмінник, забезпечує рівномірний теплообмін (нагрівання при «зарядці» і охолодження при «розрядці» акумулятора) в усьому об'ємі, а заповнення всього об'єму ємності теплоакуючою рідиною дозволяє покращити й підвищити якість, ефективність та інтенсифікувати процесу теплообміну;

- «теплове ядро» заповнене матеріалом з фазовим переходом церезином, що має перший пік фазового переходу при температурі близькій до 50°C і другий пік - 75°C, дозволяє подолати теплову стратифікацію, що виникає по висоті ємності ТА і інтенсифікувати процесу теплообміну;

- «теплове ядро» поле всередині, що дозволяє рухатись теплоакумуючій рідині з обох його боків, що інтенсифікує теплообмін.

2. Створено дослідний зразок мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт, а саме розроблено комплект робочої конструкторської документації, що включає:

- технічне завдання на мобільний тепловий акумулятор контейнерного типу;
- проект та виготовлення блочного індивідуального теплового пункту;
- паспорт на мобільний тепловий акумулятор мобільний контейнерного типу
- програму та методики приймальних випробувань теплоаккумулятор мобільний контейнерного типу;
- комплект креслень та специфікацій.

За розробленим комплектом конструкторської документації створено дослідний зразок мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт.

3. Проведено монтажні та пуско-налагоджувальні роботи дослідного зразка мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт.

4. Проведено попередні випробування дослідного зразка, досліджено основні параметри та особливості процесів заряду і розряду паралельного і послідовного з'єднання акумулюючих ємностей в секції акумуляції. За результатами випробувань встановлено робочі параметри тиску до 0,3МПа, температури в межах від 30 до 90 °С та теплової продуктивності до 0,78МВт.

5. Проведено натурні випробування дослідного зразка мобільного теплового акумулятору МТА-0,5МВт, за результатми досліджень обладнання виведено на стандартний режим роботи і передано на дослідну-експлуатація в Медикореабілітаційний центр МВС «Кремінці». За експлуатаційний опалювальний період 2022-2023 рр., а саме 135 годин роботи МТА-0,5МВт економія електроенергії склала 2700 кВт·год, що у грошовому еквіваленті 13867 грн., за вказаний період.

6. За результатами проведених робіт створено концепт дискретної системи опалення з застосування мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт. Концепт реалізує транспортування теплової енергії для забезпечення віддалених військових об'єктів, критичної інфраструктури та споживачів систему теплозабезпечення яких пошкоджено внаслідок руйнування.

7. За попередньою оцінкою інтегральних показників економічної ефективності проведеної за двома сценаріями реалізації проекту при тепловій потужності дослідного зразка мобільного теплового акумулятора 0,5 МВт (проектне значення) та 0,78 МВт (встановлене значення), у результаті орієнтовні точки беззбитковості становлять 3594827,0 грн та 5650966,0 грн, відповідно.

ВИСНОВКИ

1. В результаті математичного аналізу було виведено рівняння яке описує процес нагрівання матеріалу з фазовим переходом всередині «теплого ядра» враховуючи радіальне перенесення теплоти.

Досліджено розрахункові залежності теплоємності матеріалу з фазовим переходом від температури враховуючи змінення теплоємності по косинусоїдальному закону, що в результаті порівняння експериментальних і отриманих розрахункових даних продемонстрували високу степні узгодження. За результатами проведеного розрахунку визначено робочий діапазон температур теплоакumuлюючих речовин до 90°C.

2. У результаті аналітичних і експериментальних досліджень було підтверджено вірність вибору РСМ для «теплого ядра», а саме в дослідному зразку МТА-0,5МВт використано церезин, який має складний пік плавлення в діапазоні температур від 30 до 88 °C.

3. У даній роботі отримано розв'язок задачі радіаційно-конвективного теплообміну при плівковому кипінні рідини на вертикальній нагрітій пластині. Розглянуто стаціонарну та нестаціонарну задачі теплообміну, остання описує миттєве (вибухове) кипіння рідини на нагрітій поверхні.

4. Отримано аналітичний розв'язок задач стаціонарного режиму для граничних умов, що містять постійну температуру стінки та постійний тепловий потік стінки. Показано вплив випромінювання та різниці температур між стінкою та рідиною на профілі температури в паровій плівці. При 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.

5. В результаті вирішення нестаціонарної задачі отримано залежну від часу зміну профілю температури та коефіцієнта тепловіддачі в паровій плівці. Показано

вплив випромінювання (числа Старка) на коефіцієнт тепловіддачі. Збільшення радіаційного теплового потоку призводить до збільшення числа Нуссельта і часу, за який процес теплопередачі виходить на стаціонарний режим.

6. Аналіз результатів показує, що тип граничних умов ($T_w = \text{const}$ and $q_w = \text{const}$) мало впливає на характер радіаційно-конвективного теплообміну при кипінні плівки рідини на вертикальній нагрітій стінці.

Проведений розрахунок дозволив встановити обмежуючу температуру якої можливо досягати в акумуляційних ємностях до 150°C і дозволив дослідити характер перебігу теплообміну при перевищенні цієї температури.

7. Розроблено нестационарну модель осцилюючого потоку рідини у плоских та циліндричних каналах з пористим середовищем. Аналітичні дані порівнювалися з чисельними результатами одержаними за допомогою методу ґраток Больцмана. Отримані результати мають високу степінь узгоджуваності. Показано, що поведінка осцилюючого потоку рідини при впливі осцилюючого градієнта тиску визначається двома безрозмірними параметрами Sh (числа Струхаля) та Da (числа Дарсі). Зі збільшенням значення частоти (Sh) у плоскому та круглому каналах максимум опосередкованого за період коливань потоку частинок зміщується від центру до периферії.

8. Зі зростанням кількості осциляцій зростає хаотичність руху носіїв та кількість їх зіткнень, що також призводить до зростання опору. Збільшення параметра Da (зменшення впливу зіткнень носіїв) призводить до збільшення щільності потоку. Зі зростанням частоти вплив параметра Da зменшується через утворення вихорів.

9. Отримані результати сідчать про виникнення осциляцій в процесі руху теплоносія під час шар інкапсульованого матеріалу з фазовим переходом, що свідчить про недоцільність його застосування при мобільному транспортуванні теплової енергії.

10. В результаті огляду літературних джерел та аналізу ринку України було підібрано основні компоненти для створення низькотемпературної вибухо-і пожежобезпечної теплоакумуючої рідини транспортування якої не обмежується діючим законодавством. З огляду на зазначене, для досліджень відібрано водорозчинні полімери рослинного походження, які широко застосовуються в харчовій промисловості, а саме - гуарова і ксантанова камеді, карбоксиметилцелюлоза.

11. У якості розчинника для теплоакумуючої рідини використано воду та антифриз на основі речовини природнього походження бішофіту у співвідношенні 70:30, що задовольняє технічним характеристикам теплоносія за температурам кипіння і замерзання.

12. Підібрано сучасні відповідні методики досліджень теплоакумуючої здатності методом T-history, питомої теплоємності, густини, водневого показника теплоакумуючої рідини. Створено необхідні експериментальні стенди. Точність і надійність результатів експериментальних досліджень зумовлена використанням сучасних вимірювально-реєструючих приладів.

13. В результаті експериментальних досліджень методом T-history встановлено, що теплоакумуюча рідина, окрім води і антифризу має містити:

- гуарову камедь, оскільки вони дозволяють створити речовину, що значно подовжує строк зберігання теплоти у порівняння 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%;

14. В результаті проведених комплексних експериментальних досліджень встановлено доцільність використання у складі теплоакумуючого матеріалу – воду, антифриз, ксантанову і гуарову камеді.

15. В результаті дослідження питомої теплоємності теплоакumuлюючої рідини у порівнянні з водою, ТАМ до термоциклування має меншу теплоємність у межах від 9,35 до 10,3 %. Встановлено, що відбувається поступове зниження теплоакumuлюючої здатності зразків створеної теплоакumuлюючої рідини. 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 тільки приготовленою теплоакumuлюючої рідини до термоциклування. В результаті експериментальних досліджень встановлено строк експлуатації теплоакumuлюючої рідини у теплових акумуляторах ємнісного типу об'ємом 1,5 м³, він складає не менше 2÷4 років.

16. В результаті проведених експериментальних досліджень водневого показника і густини встановлено, що при експлуатації теплоакumuлюючої рідини у діапазоні температур від 20 до 90°C в мобільному тепловому акумуляторі МТА-0,5МВт протягом чотирьох опалювальних сезонів рН залишається нейтральним, а густина змінюється в межах 1–2%. Встановлено, що досліджені показники не мають обмежуючого характеру при експлуатації мобільного теплового акумулятора МТА–0,5МВт немає. А теплоакumuлююча рідина не потребує заміни протягом, що найменше, 2-4 опалювальних сезонів. Це важливий економічний показник, з огляду на вартість теплоакumuлюючої рідини і складність робіт по його заміні в акумуляційних ємностях.

17. Запропоновано створення мобільного технологічного комплексу для приготування водорозчинних полімерів, що дозволить отримати якісну теплоакumuлюючу рідину без додаткових енергетичних витрат в промислових масштабах.

18. В результаті проведеного моделювання взаємодії частинок в теплоакumuлюючій рідині досліджено співвідношення потенціалів систем «колоїд-колоїд»/ «колоїд-розчинник» з метою утворення результуючих структур,

встановлено співвідношення потенціалів структуроутворення частинок сухих речовин.

19. Результати досліджень експериментальної і розрахункової структур системи, що містять помітні глобулярні структури колоїдних часток, якісно досить добре корелюються, що свідчить про адекватність застосування даної моделі для акумуляційних рідин.

20. В результаті аналізу теплофізичних, хімічних та експлуатаційних властивостей матеріалів з фазовим переходом, викладених у літературних джерелах і нормативних документах що регламентують застосування РСМ у мобільних теплових акумуляторах, з урахуванням обмеженого діапазону транспортування речовин на території України, для досліджень було обрано парафіни – петролатум і церезин та віск – озокерит.

21. Дослідження питомої теплоємності зразків матеріалів з фазовим переходом в залежності від зміни температури у діапазоні від 30 до 90°C свідчать про доцільність застосування речовин – церезину і озокериту. Оскільки, у зразків петролатуму пік значення питомої теплоємності має максимальне значення 3690,54 Дж/кг·К, а середнє значення в межах 2010...3300 Дж/кг·К. У церезину та озокериту ці значення піків - 4872,06 та 6437,82 Дж/кг·К, а середнє значення питомої теплоємності варіюється в межах 3350...4600 та 3100...4400 Дж/кг·К, відповідно.

22. В результаті аналітичного дослідження акумуляційної здатності досліджуваних матеріалів з фазовим переходом з урахуванням характеру протікання процесів плавлення/затвердіння для застосування в «тепловому ядрі» теплоакumuлюючих ємностях мобільного теплового акумулятору обрано церезин, оскільки він має складний пік фазового переходу в найширшому діапазоні температур від 32,5 до 87,5, що зумовлює найвищу теплоту фазового переходу до 1157,12 кДж/кг.

23. Аналіз отриманих результатів теплоти фазового переходу матеріалів з фазовим переходом (петролатум 560,0 кДж/кг, церезин 1157,12 кДж/кг і 728,24кДж/кг) і діапазону температури в якому відбувається перехід, дозволяє зробити висновок про доцільність застосування церезину у «тепловому ядрі».

24. В результаті експериментальних досліджень методом T-history встановлено, що матеріал з фазовим переходом церезин при тривалому термоциклуванні до 40 циклів, що заповнює «теплове ядро» в конструкції M-TES, відбуваються зміни в масі РСМ до 2%, що свідчить про безпечність і надійність його використання.

25. Оптимізовано конструкцію теплового акумулятору ємнісного типу з двома робочими ємностями у якій застосовано три робочих тіла – теплоакumuлююча рідина, яка заповнює весь об'єм ємності ТА; матеріал з фазовим переходом розташований у «тепловому ядрі» встановленому по центру ємності ТА і вода у якості теплоносія, що рухається по спіралі у «змієвиковому» теплообмінному елементі дозволили підвищити інтенсифікацію процесу теплообміну, зокрема:

- спіральний теплообмінний пристрій, забезпечує рівномірний теплообмін (нагрівання при «зарядці» і охолодження при «розрядці» МТА-0,5МВт) в усьому об'ємі, а заповнення цього об'єму ємності теплоакumuлюючою рідиною дозволяє підвищити ефективність та інтенсифікувати процесу теплообміну;

- «теплове ядро» заповнене матеріалом з фазовим переходом церезином, що має перший пік фазового переходу при температурі близькій до 50°C і другий пік - 75°C, дозволяє подолати теплову стратифікацію, що виникає по висоті ємності ТА і інтенсифікувати процесу теплообміну;

- «теплове ядро» поле всередині, що дозволяє рухатись теплоакumuлюючій рідині з обох його боків, що інтенсифікує теплообмін в ємності ТА.

26. Створено дослідний зразок мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт, а саме розроблено комплект робочої конструкторської документації, що включає - технічне завдання, паспорт, комплект креслень і специфікацій для виготовлення МТА-0,5МВт, проект та виготовлення блочного ІТП, програму та методики приймальних випробувань МТА.

27. За розробленим комплектом конструкторської документації створено дослідний зразок мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт. Проведено монтажні та пуско-налагоджувальні роботи, що підтверджують надійність і працездатність створеної конструкції.

28. Проведено попередні випробування дослідного зразка, досліджено основні параметри та особливості процесів заряду і розряду паралельного і послідовного з'єднання акумуляуючих ємностей в секції акумуляції. За результатами випробувань встановлено робочі параметри тиску до 0,3МПа, температури в межах від 30 до 90 °С та теплової продуктивності до 0,78МВт.

29. Проведено натурні випробування дослідного зразка мобільного теплового акумулятору МТА-0,5МВт, за результатми досліджень обладнання виведено на стандартний режим роботи і передано на дослідну-експлуатація в Медикореаблітаційний центр МВС «Кремінці». За експлуатаційний опалювальний період 2022-2023 рр., а саме 135 годин роботи МТА-0,5МВт економія електроенергії склала 2700 кВт·год, що у грошовому еквіваленті 13867 грн., за вказаний період.

30. За результатами проведених робіт створено концепт дискретної системи опалення з застосування мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт. Концепт реалізує транспортування теплової енергії для забезпечення віддалених військових об'єктів, критичної інфраструктури та споживачів систему теплозабезпечення яких пошкоджено внаслідок руйнування.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Омельченко В. (2024). Енергетика України 2024–2025 років у тумані невизначеності. *Разумков центр*. <https://razumkov.org.ua/statti/energetyka-ukrainy-20242025-rokiv-u-tumani-nevyznachenosti>
2. Теплові електростанції України. [НАК «Енергетична компанія України» / Діяльність Діяльність / Виробництво / Характеристика станцій](#)
3. Ткачук А. (2024). Про стан електрогенерації України в умовах війни та першочергові кроки у громадах стосовно посилення їх стійкості <https://www.csi.org.ua/news/pro-stand-elektrogeneracziyi-ukrayiny-v-umovah-vijny-ta-pershochergovi-kroky-u-gromadah-stosovno-posylennya-yih-stijkosti>.
4. 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.
5. 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
6. Wirtza M., Kivilipa L., Remmena P., Mullera D. (2020). 5th Generation District Heat-ing: A novel design approach based on mathematical optimization. *Applied Energy*. Vol. 260. pp. 114158. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114158>.
7. Yang L., Villalobos U., Akhmetov B., Gil A., Khor J.O., Palacios A., Li Y., Ding Y., Cabeza L.F, Tan W.L., Romagnoli A. (2021). A comprehensive review on sub-zero temperature cold thermal energy storage materials, technologies, and applications: State of the art and recent developments. *Applied Energy*. Vol. 288. pp. 116555 <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116555>.

8. Демченко В.Г., Коник А.В. (2020). Основні аспекти процесів теплоакumuлювання. *Наукові праці* 1 (84), 48-53. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v84i1.1868>
9. Демченко В.Г., Коник А.В. (2020). Зменшення непродуктивних теплових втрат при генерації енергії. *Вісник Національного технічного університету: Серія «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування»*, 1(3), 30 – 34. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2020.01.05>
10. Li Z., Lu Y., Huang R, Chang J., Yu X., Jiang R., Yu X., Roskilly A.P. (2021). Applications and technological challenges for heat recovery, storage and utilization with latent thermal energy storage. *Applied Energy*. 283, 116277 <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116277>.
11. 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.
12. Демченко В.Г., Коник А.В. (2021). Мобільний тепловий акумулятор. *Матеріали конференції. Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XXII міжнародної науково-практичної конференції*, 20-21 травня 2021р.К.: Інтерсервіс, 298-302. <https://doi.org/10.36296/renewable.conf.20-21.05.2021>
13. Krönauer A., Lävemann E., Brückner S., Hauer A. (2015). Mobile Sorption Heat Storage in Industrial Waste Heat Recovery. *Energy Procedia*, 73, 272-280. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.688>
14. Wang W. (2010). Mobilized thermal energy storage for heat recovery for distributed heating. Mälardalen University.

15. Guo S., Zhao J., Bertrand A., Jinyue Y. (2022). Mobilized thermal energy storage for clean heating in carbon neutrality era: A perspective on policies in China. *Energy and Buildings* 277, 112537. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112537>
16. Phase Change Materials (2018). Gütesicherung. Quality Assurance RAL-GZ 896. DEUTSCHES INSTITUT FÜR GÜTESICHERUNG UND KENNZEICHNUNG E.V.
17. Efficient compact modular thermal energy system storage. (2024). D2.1 – State of the Art of TES in Europe. Ref. Ares(2024)2334592 <https://echo-euproject.eu/wp-content/uploads/2025/01/State-of-the-Art-of-TES-in-Europe.pdf>
18. Lizana J., Chacarteguib R., Barrios-Paduraa A., Valverdec J.M., Ortizc C. (2018). Identification of best available thermal energy storage compounds for low-to-moderate temperature storage applications in buildings. *Materials de Construction*. 68 (331), 160. <https://doi.org/10.3989/mc.2018.10517>
19. Demchenko V., Konyk A. (2022). Mobile thermal energy storage (M-TES). *JNTES*. 91-96.
20. Brychka S.Ya. (2022). Heat accumulation with montmorillonite/carnauba wax nanomaterials. *Energy Technologies & Resource Saving. Energy saving technologies*, 3, 58-69. <https://doi.org/10.33070/etars.3.2022.04>
21. Pirasaci T., GoswamiY. (2015). Influence of design on performance of a latent heat storage system for a direct steam generation power plant. *Applied Energy*, 162, 644-652. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.105>
22. Du K., Calautit J., Wang Z., Wu Y., Liu H. (2018). A review of the applications of phase change materials in cooling, heating and power generation in different temperature ranges. *Applied Energy*. 220, 242-273. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.005>

23. Quality Assurance RAL-GZ 896. (2018). Phase Change Materials (Phasenwechselmaterial). Gütesicherung. Deutsches Institut Für Gütesicherung Und Kennzeichnung E.V. 47. https://www.pcm-ral.org/pdf/RAL_GZ_896_Phase_Change_Material_Edition_March_2018.pdf
24. Zayed M.E., Zhao J., Lia W., Elsheikh A.H., Elbannab A., Jing L., Geweda A.E. (2020). Recent progress in phase change materials storage containers: Geometries, design considerations and heat transfer improvement methods. *Journal of Energy Storage*. 30, 101341. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101341>
25. Elarem R., Alqahtani T., Mellouli S., Askri F., Edacherian A., Vineet T., Badruddin I. A., Abdelmajid J. (2019). A comprehensive review of heat transfer intensification methods for latent heat storage units. *Energy Storage* <https://doi.org/10.1002/est2.127>.
26. Wang, X., Niu, J. and van Paassen, A.H.C. (2008a). Raising evaporative cooling potentials using combined cooled ceiling and MPCM slurry storage, *Energy and Buildings* 40, 1691–1698.
27. Lizana J., Chacarteguib R., Barrios-Paduraa A., Valverdec J.M., Ortizc C. (2018). Identification of best available thermal energy storage compounds for low-to-moderate temperature storage applications in buildings. *Materials de Construction*, 68 (331), 160. <https://doi.org/10.3989/mc.2018.10517>
28. Steinmann, W. and Eck, M. (2006). Buffer storage for direct steam generation, *Solar Energy* 80, 1277–1282.
29. Pirasaci T., Goswami Y. (2015) Influence of design on performance of a latent heat storage system for a direct steam generation power plant. *Applied Energy*, 162, 644-652. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.105>
30. Du K., Calautit J., Wang Z., Wu Y., Liu H. (2016) A review of the applications of phase change materials in cooling, heating and power generation in

different temperature ranges. *Applied Energy*. 220(C), 242-273.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.005>

31. Stritih, U. and Butala, V. (2007). Energy saving in building with PCM cold storage, *International Journal of Energy Research* 31, 1532–1544.

32. Fujita Y., Shikata I., Kawai A., Kamano H. (2006). Latent heat storage and transportation system “Trans Heat container”. *IEA/ECES Annex 18 1st Workshop and Expert Meeting*.

33. 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, Faculty of Environmental, Geomatic and Energy Engineering, Kielce University of Technology, Kielce, Poland, 68-71.

34. Shehadeh M., Kwok E., Owen J., Bahrami M. (2021). Integrating Mobile Thermal Energy Storage (M-TES) in the City of Surrey’s District Energy Network: A Techno-Economic Analysis. *MDPI, Applied Sciences*, 11(3), 1279; <https://doi.org/10.3390/app11031279>

35. Transition to Sustainable Buildings: Strategies and Opportunities to 2050. Available online: https://www.oecd-ilibrary.org/energy/transition-to-sustainable-buildings_9789264202955-en

36. Li H., Wang W., Yan J., Dahlquist E. (2013). Economic assessment of the mobilized thermal energy storage (M-TES) system for distributed heat supply. *Applied Energy*, 104, 178–186.

37. Deckert M., Scholz R., Binder S. (2014). Economic efficiency of mobile latent heat storages. *Energy Procedia*, 46, 171-177.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.17>

38. MacPhee, D. and Dincer, I. (2009). Thermal modeling of a packed bed thermal energy storage system, *Applied Thermal Engineering* 29, 695–705.

39. Erek, A. and Dincer, I. (2009). A new approach to energy and exergy analyses of latent heat storage unit. *Heat Transfer Engineering* 30 (6), 505–515.
40. Zhongyineng Beijing technology, M-TES container. <http://www.zhongyineng.com/product/l25.html>
41. Qingdao Aohuan new energy group, M-TES vehicle, <http://www.qdaohuan.com/page45>
42. Matuszewska D., Kuta M., Olczak P. (2020). Techno-Economic Assessment of mobilized thermal energy storage system using geothermal source in Polish conditions. *Energies*, 13(13), 3404. <https://doi.org/10.3390/en13133404>
43. Kuta M., Mlonka-Mędrala A., Radoms E., Gołdasz A. (2025). Mobile thermal energy storage a review and analysis in the context of waste heat recovery. *Energies*, 18(15), 4136; <https://doi.org/10.3390/en18154136>
44. Demchenko V., Konyk A. (2022). Mobile thermal energy storage (M-TES). *JNTES*, 91-96.
45. Закон України «Про перевезення небезпечних вантажів» від 6 квітня 2000 р. № 1644-III.
46. Закон України від 02.03.2000. «Про приєднання України до Європейської угоди про Міжнародне дорожнє перевезення небезпечних вантажів (ДОПНВ)» від 2 березня 2000 р. № 1511-III.
47. Правила дорожнього перевезення небезпечних вантажів, затверджених наказом Міністерства внутрішніх справ України від 4 серпня 2018 р. № 656 <https://adr.dp.ua/uk/blog-uk/klassifikatsiya-opasnyh-gruzov/>
48. 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>

49. 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>

50. Коник А.В., Демченко В.Г. Дослідження властивостей низькотемпературного теплоакумуючого матеріалу з фазовим переходом. *Збірник тез доповідей XIX міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання"* 25-26 листопада 2020, Київ, 31-34.

51. Демченко В.Г., Коник А.В., Фалько В.Ю. Патент на винахід №128359, Україна. МПК C09K5/00, C09K5/20, C23F11/00. 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.

52. Defreeze. Теплохолодоносії для автономних систем опалення і охолодження, холодильних агрегатів. Технічний паспорт, с. 4.

53. Environmental Process Systems Ltd
<http://www.epsltd.co.uk/products.htm>

54. Larwa B., Cesari S., Bottarelli M. (2021). Study on thermal performance of a PCM enhanced hydronic radiant floor heating system. *Energy*, 225 120245, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120245>.

55. Phase Change Materials: Thermal Management Solutions
<https://www.pcmproducts.net/>

56. Templok. <https://e-4epcm.it/product/templok/>

57. Baccaga E., Bottarelli M., Gallero F.J.G., Maestre I.R., Pei G., Su Y. (2023). Improving thermal performance of a ventilated tiled roof by using phase

change materials. International Journal of Low Carbon Technologies, <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctad047>

58. Демченко В.Г., Баранюк О.В., Рачинський А.Ю. (2023). Моделювання течії і теплообміну в баку-акумуляторі теплоти. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія : Математичне моделювання в техніці та технологіях.* 1, 96-102. http://nbuv.gov.ua/UJRN/vcpimm_2023_1_16

59. Kamenicky R., Frank M., Drikakis D., Ritos K. (2022). Film boiling conjugate heat transfer during. Immersion Quenching. *Energies* 15: 4258. <https://doi.org/10.3390/en15124258>

60. Bergman Th.L., Incropera F.P., DeWitt D.P., Lavine A.S. (2011). Fundamentals of heat and mass transfer. Seventh edition. John Wiley and Sons: 1039 p.

61. Sparrow E.M. (1964). The effect of radiation on film-boiling heat transfer Author links open overlay panel. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 7(2): 229-238. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(64\)90087-0](https://doi.org/10.1016/0017-9310(64)90087-0)

62. Krishnameti M.V., Ramakhandran A. (1969). Effect of radiation on boundary-layer film boiling. *Journal of engineering physics*, 17, 1337–1348. <https://doi.org/10.1007/BF00828309>

63. Yen H-C., Yang W-J. (1969). Analysis of laminar film boiling in boundary layer flows with appreciable radiation. *Applied Scientific Research*, 20, 178-204. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00382392>

64. Sakurai A., Shiotsu M., Hata K. (1990). A general correlation for pool film boiling heat transfer from a horizontal cylinder to subcooled liquid: part 1-a theoretical pool film boiling heat transfer model including radiation contributions and its analytical solution. *Heat Transfer*, 112(2): 430-440. <https://doi.org/10.1115/1.2910396>

65. Avramenko A.A., Shevchuk V.I., Tyrinov A.I., Blinov D.G. (2015). Heat transfer in stable film boiling of a nanofluid over a vertical surface. *Thermal Sciences*, 92, 106-118. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2015.01.031>
66. Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Abdallah S., Blinova D.G., Harmandd S., Tyrinov A.I. (2016). Symmetry analysis for film boiling of nanofluids on a vertical plate using a nonlinear approach. *Journal of Molecular Liquids*, 223, 156 – 164. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.08.038>
67. Olver P. J. (1993). Applications of Lie Groups to Differential Equations. *Texts in Mathematic, Springer Science & Business Media*, 107, 513
68. Hu H. (2015). Influences of interfacial shear in turbulent film boiling on a horizontal tube with external flowing liquid. *Engineering*, 7, 754-764. <https://doi.org/10.4236/eng.2015.711066>
69. Hu H-P. (2018). Simplified Approach of Turbulent Film Boiling on a Horizontal Elliptical Tube with Surface Tension Effects. *International Journal of Energy Science and Engineering*, 4(1), 1-11. <http://www.aiscience.org/journal/ijese>
70. Dinh T.N., Dinh A.T., Nourgaliev R.R., Sehgal B.R. (1999). Investigation of film boiling thermal hydraulics under FCI conditions: results of analyses and a numerical study. *Nuclear Engineering and Design*, 189 (1-3), 251–272. [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(98\)00276-3](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(98)00276-3)
71. Joksimovic M.G., Hussong J., Tropea C., Roisman V. (2023). Spray impact onto a hot solid substrate: Film boiling suppression by lubricant addition. *Fluid Dynamics* <https://doi.org/10.3389/fphy.2023.1172584>
72. Tyrinov A.I., Avramenko A.A., Basok B.I., Davydenko B.V. (2012). Modeling of flows in a microchannel based on the Boltzmann lattice equation. *J. Engineering Physics and Thermophysics*, 85 (1), 65-72. <https://doi.org/10.1007/s10891-012-0621-1>

73. Avramenko A.A., Kovetska Yu.Yu., Shevchuk I.V., Tyrinov A.I., Shevchuk V.I. (2018). Mixed Convection in Vertical Flat and Circular Porous Microchannels. *Transport in Porous Media*, 124(3): 919 – 941. <https://doi.org/10.1007/s11242-018-1104-4>
74. Avramenko A.A., Tyrinov A.I., Shevchuk I.V., Dmitrenko N.P., Kravchuk A.V., Shevchuk V.I. (2017). Mixed convection in a vertical flat microchannel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 106, 1164 – 1173. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.10.096>
75. Layssac T., Lips S., Revellin R. (2019). Effect of inclination on heat transfer coefficient during flow boiling in a mini-channel. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 132, 508-518. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2018.12.001>
76. Lie S., Engel P. (1888). *Teorie der Transformationsgruppen*. Leipzig, Bd.1
77. Lie S., Engel P. (1890). *Teorie der Transformationsgruppen*. Leipzig, Bd.2
78. Lie S., Engel P. (1893). *Teorie der Transformationsgruppen*. Leipzig, Bd.3
79. Baehr H.D., Stephan K. (2006). *Heat and Mass Transfer*, second, revised ed., Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany.
80. Vinogradova O.I. (1995). Coagulation of Hydrophobic and Hydrophilic Solids under Dynamic Conditions. *J. Colloid Interface Science*, 169, 306-312.
81. Succi S. (2001). *The Lattice Boltzmann Equation for Fluid Dynamics and Beyond*. Oxford University Press. ISBN 0-19-850398-9
82. Bhatnagar P.L., Gross E.P., Krook M. (1954). A model for collision processes in gases. Small amplitude processes in charged and neutral one component systems. *Physical Review*, 94, 511-525.

83. Shan X, Chen H. (1993). Lattice Boltzmann model for simulating flows with multiple phases and components. *Physical Review*. E 47, 1815–1819.

84. Shan X, Chen H. (1994). Simulation of nonideal gases and liquid-gas phase transitions by the lattice Boltzmann equation. *Physical Review*, E 49, 2941–2948.

85. He X., Luo L. (1997). Theory of the lattice Boltzmann method: from the Boltzmann equation to the lattice Boltzmann equation. *Physical Review*, E 56, 6811.

86. Schatz G.C, Kopperman A. (1975). Quantum mechanical reactive scattering: An accurate three-dimensional calculation. *Chemistry Physics*, 62, 2502-2503.

87. Alder B.J., Waingwright T.E. (1957). Phase Transition for a Hard Sphere System. *Chemical Physics*, 27(5), 1208 - 1209.

88. Gibson J.B., Goland A. N., Milgram M., Vineyard G.H. (1960). Dynamics of radiation damage. *Physical Review*, 120 (4), 1229 - 1231.

89. Verlet L. (1967). Computer "Experiments" on Classical Fluids. I. Thermo-dynamical Properties of Lennard-Jones Molecules. *Physical Review*, 159(1), 98 - 103.

90. Vibrational Modes: atoms are spheres and bonds are springs
http://www.pci.tu-bs.de/aggericke/PC4e/Kap_V/Normalschwingungen.htm,
http://lqtc.fcien.edu.uy/cursos/Fq2/Teoricos/6.Metodos_y_props_moleculares_2006.pdf

91. Computational chemistry tools application of computational methods.
Режим доступа:
<https://www.slideshare.net/slideshow/lectureno2computationalchemistrytoolsapplicationofcomputationalmethodspptpdf/260028392>

92. Molecular mechanics and dynamics. Режим доступа:
<https://employees.csbsju.edu/hjakubowski/classes/ch331/protstructure/mechdynam2041416.html>

93. Molecular mechanics and dynamics. Режим доступа: <https://biochem-vivek.tripod.com/id26.html>

94. Durrant J.D., Mc Cammon J.A. (2011). Molecular dynamics simulations and drug discovery. *BMC Biology*, 9(71), 1-9
<https://link.springer.com/article/10.1186/1741-7007-9-71>

95. Lewis J. P., Sankey O. F. (1995). Geometry and energetics of DNA basepairs and triplets from first principles quantum molecular relaxations. *Biophysics*, 69, 1068-1076.

96. Alfonso D. R., Ulloa S. E., Brenner D. W. (1994). Hydrocarbon adsorption on a diamond (100) stepped surface. *Physical Review*, 49(7), 4948-4953.

97. Brenner D. W. (1990). Empirical potential for hydrocarbons for use in simulating the chemical vapor deposition of diamond films. *Physical Review*, 42(15), 9458-9471.

98. Jorgensen W. L. et al. (1983). Comparison of simple potential functions for simulating liquid water. *Chemical Physics*, 79(2), 926-935.

99. Warshel A., Levitt M. (1976). Theoretical studies of enzymic reactions: Dielectric, electrostatic and steric stabilization of the carbonium ion in the reaction of lysozyme. *Molecular Biology*, 103, 227-249.

100. Nemukhin A.V., Grigorenko B.L., Bochenkova A.V. et. al. (2002). A QM/MM approach with effective fragment potentials applied to the dipeptide–water structure. *Molecular Structure*, 581, 167–175.

101. Darden T., York D., and Pedersen L. (1993). Particle mesh Ewald: An $N \log(N)$ method for Ewald sums in large systems. *Chemical Physics*, 98(12):10089–10092.

102. Pulay P. (1969). Ab initio calculation of force constants and equilibrium geometries in polyatomic molecules. I Theory. *Molecular Physics*, 17, 197-204.

103. Espa~nol P., Warren P.B. (1995). Statistical mechanics of dissipative particle dynamics. *Europhys. Lett.*, 30:191.
104. Allen M.P., Tildesley D.J. (1989). Computer simulation of liquids. *Clarendon Press*.
105. Frenkel D., Smit. B. (1996). Understanding molecular simulation: From algorithms to applications. *Academic Press*.
106. Lowe C. P. (1999). An alternative approach to dissipative particle dynamics. *Europhys. Lett.*, 47:145.
107. Електрочисник MTX1A10.DF.2L0-YD4 однофазний багатотарифний 5-60A Internet resource: <https://elmisto.com.ua/ua/p626884512-elektroschetchik-mtx1a10df2l0-yd4.html>
108. Тирінов А. І. (2017). Тепломасообмін та гідродинаміка мікро- та нанопроцесів в елементах теплотехнічного устаткування – на правах рукопису. *Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук спеціальністю 05.14.06 – «Технічна теплофізика і промислова теплоенергетика»*, 353.
109. Демченко В.Г., Коник А.В. (2021). Мобільний тепловий акумулятор. *Матеріали конференції Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XXII міжнародної науково-практичної конференції м.Київ, 20-21 травня 2021р. Інтерсервіс, 298-302* <https://doi.org/10.36296/renewable.conf.20-21.05.2021>
110. 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>
111. 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.

112. Демченко В.Г., Коник А.В., Фалько В.Ю. (2022). Стенди та методика проведення досліджень темоциклювання матеріалів з фазовим переходом різної в'язкості. *Збірник тез доповідей XXII 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.

113. Коник А В, Демченко В.В. (2020). Дослідження властивостей низькотемпературного теплоакумуючого матеріалу з фазовим переходом. *Збірник тез доповідей XIX міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих учених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання»*, 31-34.

114. Демченко В.Г., Коник А.В., Фалько В.Ю. (2024). Застосування речовин з фазовим переходом у ємнісних теплових акумуляторах. *Матеріали XXV міжнародної науково-практичної конференції відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI СТОЛІТТІ. 22–24 травня 2024 року, Київ.* <https://doi.org/10.36296/renewable.conf.22-24.05.2024>

115. Демченко В.Г., Коник А.В., Целень Б.Я. (2020). Дослідження органічних речовин з фазовим переходом з метою їх використання в акумуляторах теплоти. *Збірник тез до-повідей XVIII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених, 21-22 травня 2020р. Київ*, 58-59.

116. 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>

117. Layssac T., Lips S., Revellin R. (2019). Effect of inclination on heat transfer coefficient during flow boiling in a mini-channel. *Heat and Mass Transfer*, 132, 508-518. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.001>
118. Sparrow E.M., Cess R.D. (1966). Radiation heat transfer/ Brooks/Cole publishing company. *Belmont, California*, 322.
119. Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Moskalenko A.A., Lohvynenko P.N., Kovetska Yu. Yu. (2018). Instability of a vapor layer on a vertical surface at presence of nanoparticles. *Applied Thermal Engineering*, 139, 87-98. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.113>
120. Cengel, Y. A. (2002). Heat Transfer: A Practical Approach, 2nd ed., McGraw-Hill Education, *Higher Education*, 921.
121. Avramenko A.A., Shevchuk I.V. (2022). Modelling of Convective Heat and Mass Transfer in Nanofluids With and Without Boiling and Condensation. *Springer International Publishing*, 263.
122. Bromley L.A. (1950). Heat transfer in stable film boiling. *Chemical Engineering Progress*, 46, 221-227.
123. Ellison M.E. (1954). A study of the mechanism of boiling heat transfer. *Jet Prop. Lab. Memo, CIT 20*: 1–88. <https://resolver.caltech.edu/CaltechETD:etd-04232003-095944>
124. Avramenko, A. A., Shevchuk, I. V. (2022). Modelling of Convective Heat and Mass Transfer in Nanofluids With and Without Boiling and Condensation, *Springer International Publishing*, 263.
125. 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>

126. 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>
127. Avramenko A.A., Kovetska Yu.Yu., Shevchuk I.V., Tyrinov A.I., Shevchuk V.I. (2018) Mixed Convection in Vertical Flat and Circular Porous Microchannels. *Transport in Porous Media*, 124 (3), 919 – 941.
128. Avramenko A.A., Kovetska Yu.Yu., Shevchuk I.V., Tyrinov A.I., Shevchuk V.I. (2019). Heat Transfer in Porous Microchannels with Second-Order Slipping Boundary Conditions. *Transport in Porous Media*, 129 (3), 673 – 699.
129. Avramenko A.A., Tyrinov A.I., Kovetska Yu.Yu, Konyk A.V. (2024) Oscillating flow of viscous electron fluids. *Chinese Journal of Physics*, <https://doi.org/10.1016/j.cjph.2023.12.010>
130. Bhatnagar, P.L., Gross, E.P., Krook, M. (1954). A Model for Collision Processes in Gases. I. Small Amplitude Processes in Charged and Neutral One-Component Systems. *Physical Review*, 94(3), 511–525. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.94.511>
131. Tyrinov A.I., Avramenko A.A., Basok B.I., Davydenko B.V. (2012). Modeling of flows in a microchannel based on the boltzmann lattice equation. *Engineering Physics and Thermophysics*, 85(1), 65–72. <https://doi.org/10.1007/s10891-012-0621-1>
132. He X., Luo L.-S. (1997). Theory of the lattice Boltzmann method: From the Boltzmann equation to the lattice Boltzmann equation. *Physical Review E*, 56(6), 6811–6817. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.56.6811>
133. Zou Q., He X. (1997). On pressure and velocity boundary conditions for the lattice Boltzmann BGK model. *Physics of Fluids*, 9(6), 1591–1598. <https://doi.org/10.1063/1.869307>

134. Wheeler H. A. (1942). Formulas for the Skin Effect. Proceedings of the IRE, 30(9), 412–424. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1942.232015>
135. Yakhot A., Arad M., Ben-Dor G. (1998). Richardson's Annular Effect in Oscillating Laminar Duct Flows. *Fluids Engineering*, 120(1), 209–211. <https://doi.org/10.1115/1.2819652>
136. Torre I., Tomadin A., Geim A. K., Polini M. (2015). Nonlocal transport and the hydrodynamic shear viscosity in graphene. *Physical Review B*, 92(16), 165433.
137. Levy S. M. (2012). Electrical Formulas and Calculations. In Construction Calculations Manual *Elsevier*. 635–671 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382243-7.00014-0>
138. Chandra M., Kataria G., Sahdev D., Sundararaman R. (2019). Hydrodynamic and ballistic AC transport in two-dimensional Fermi liquids. *Physical Review B*, 99(16), 165409. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.165409>
139. Huang, L., Petermann, M. and Doetsch, C. (2009). Evaluation of paraffin/water emulsion as a phase change slurry for cooling applications, *Energy* 34, 1145–1155.
140. Fang G., Li H., Yang F., Liu X. and Wu S. (2009). Preparation and characterization of nano-encapsulated n-tetradecane as phase change material for thermal energy storage, *Chemical Engineering Journal* 153, 217–221.
141. Günther, E., Mehling, H. and Hiebler, S. (2007). Modeling of subcooling and solidification of phase change materials, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering* 15, 879–892
142. Коник А.В., Декуша Г.В. (2024). Дослідження теплофізичних характеристик теплоакumuляційного матеріалу. *Scientific Works*, 88(1), 57-62. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2961>

143. 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>

144. Karboksimetiltselyuloza [Carboxymethylcellulose]. Retrieved from Карбоксиметилцелюлоза — Вікіпедія (wikipedia.org). (2022, July, 14)

145. E466 – Karboksimetiltselyuloza. Vse o Ye-dobavkakh i sostave produktov [E466 - Carboxymethyl-cellulose. All about E-additives and the composition of products]. Retrieved from <https://dobavkam.net/additives/e466> (2022, July, 14)

146. Carboxymethyl cellulose .
https://en.wikipedia.org/wiki/Carboxymethyl_cellulose

147. Ksantanova kamed' [Xanthan gum]. Retrieved from Ксантанова камедь - Вікіпедія (wikipedia.org) [in Ukrainian]. (2022, July, 14)

148. Plank J. (2005). Applications of Biopolymers in Construction Engineering. *Biopolymers Online: Biology. Chemistry. Biotechnology. Applications* <https://doi.org/10.1002/3527600035.bpola002>

149. Jain R., Mahto T. K., Mahto V. (2016). Rheological investigations of water based drilling fluid system developed using synthesized nanocomposite. *Korea-Australia Rheology Journal*, 28, 55–65.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s13367-016-0006-7>

150. Alamgir A.N.M. (2018). Phytoconstituents - Active and Inert Constituents, Metabolic Pathways, Chemistry and Application of Phytoconstituents, Primary Metabolic Products, and Bioactive Compounds of Primary Metabolic Origin. *Therapeutic Use of Medicinal Plants and their Extracts*, 2, 25–164.
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-92387-1_2

151. Ravindra V., Gadhav. (2023). Xanthan Gum – Bio-Based Raw Material for Wood Adhesive. *Green and Sustainable Chemistry*, 13, 153-161. <https://doi.org/10.4236/gsc.2023.132008>

152. Xanthan gum. Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Xanthan_gum

153. ТУ У 24.6-36993892-001:2011. «Теплохолодоносії та водно-гліколеві розчини»

154. ДСТУ 28084-89 «Рідини охолоджуючі низькозамерзаючі. Загальні технічні умови». https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79744

155. Коник А.В., Демченко В.В. (2020). Опис стенду і методика досліджень теплофізичних властивостей бінарних водних систем. *Збірник тез доповідей XVIII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених*, 21-22 травня 2020, с. 52-53

156. Демченко В.Г., Коник А.В. Акумулятор ємнісного типу. Патент Україна на винахід. Патент 126579 Опубліковано 02.11.2022, МПК: F24H7/02 F24D15/02.

157. Demchenko V.G., Konyk A.V. Research of heat accumulation capacity binary water systems. <http://www.iosrjournals.org/iosr-jac.html>. <https://doi.org/10.9790 / 5736-1306010107>

158. Demchenko V.G., Gron S.S., Pogorelova N.D. (2019). Construction calculation of mobile heat storage. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 41(4), 35-43. <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2019.5>

159. Shah Y.T., editor. (2018). Thermal Energy: Sources, Recovery, and Applications. Boca Raton, FL, USA: CRC Press.

160. Sarbu I.A. (2018). comprehensive review of thermal energy storage. *Sustainability*. 10(2):191.

161. ДСТУ 7525:2014 Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості. *Мінекономрозвитку України* http://iccwc.org.ua/docs/dstu_7525_2014.pdf
162. 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>
163. Деркач Ф. А. (1968). Хімія.. Львів: *Львівський університет*, 312.
164. Bicarbonate. Режим доступу: <https://en.wikipedia.org/wiki/Bicarbonate>
165. Демченко В.Г., Коник А.В. (2023). Переваги поєднання роботи теплоносія і теплоаккумуляційних матеріалів у акумуляторі ємнісного типу. *Збірник тез доповідей IX Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні енерготехнології»* 11-15 вересня 2023 р, Одеса 52-53.
166. Коник А.В., Іванов С.О. (2024). Дослідження питомої теплоємності теплоаккумуляційного матеріалу на основі водорозчинних високомолекулярних вуглеводнів рослинно-го походження. *Збірник тез доповідей XXVI міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі те-хнології та обладнання"* 16 травня 2024 р., К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського». 112-116.
167. Дакуорт Р.Б. (1980). Вода в харчових продуктах. *Харчова промисловість*, 376.
168. ДСТУ 4088-2011. Якість води. Визначення рН (ISO 10523:1994, MOD). *Державний комітет України з питань технологічного регулювання та споживчої політики*, 12.
169. Франів А., Стадник В., Курляк В. (2016). Фізика низьких температур. Львів, *ЛНУ імені Івана Франка*, 362. https://physics.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/Stadnyk_FNT.pdf
170. Сланік А.В. (2009). Використання механізмів дискретно-імпульсного введення енергії для обробки води. Дисертація на здобуття ступеня

канд. техн. наук. – рукопис. Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, 203.

171. Демченко В., Коник А., Хоменко М. (2022). Мобільний технологічний комплекс для приготування водорозчинних полімерів. *Scientific Works*, 86(1), 125 - 132. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v86i1.2414>

172. Демченко В.Г., Коник А.В. Створення технологічного комплексу для приготування багатофункціональних сумішей на основі водорозчинних полімерів. *Збірник тез доповідей VIII міжнародної наукової конференції «Інноваційні енерготехнології»* м. Одеса, Україна 12-16 вересня 2022 р., с. 48-50.

173. Міні автозаправна станція REWOLT IBC 12V (RE SL012-12V), Міні автозаправна станція REWOLT IBC 12V (RE SL012-12V) - купити в інтернет магазині Rewolt

174. Дозатор ваговий FOYER FM-100 прямої дії з вібрацією Дозатор ваговий FOYER FM-100 прямої дії з вібрацією від КОЗАК+

175. Магнітна мішалка з підігрівом (20 л, аналогова, до 340 °C) ARGO-LAB M2-A Магнітна мішалка з підігрівом (20 л, аналогова, до 340 °C) ARGO-LAB M2-A

176. Дозатор сипучих УТК-100, напіваавтоматичний ваговий дозатор, Дозатор сипучих УТК-100

177. Пересувний турбінний змішувач спеціального призначення 35 л, <https://khimmix.ua/ua/smesiteli-dlya-zhidkостей/smesitel-35l-peredvizhnoj>

178. Реактор-змішувач типу РЗР-500 для в'язких продуктів, Вкладка 9. Машинобудівна продукція

179. Поршневий дозатор для розливу рідин 10-5000 мл, Поршневой дозатор для розливу жидкостей 10-5000 мл "Агротех" - 640139764

180. Phillips J.C., Hardy D.J., Maia J.D.C., Stone J.E., Ribeiro J.V., Bernardi R.C. et al. (2020). Scalable molecular dynamics on CPU and GPU architectures with NAMD. *Chemical Physics*, 153:044130 <https://doi.org/10.1063/5.0014475>
181. Humphrey W., Dalke A. and Schulten, K. (1996). "VMD - Visual Molecular Dynamics", *Molecular Graphics*, 14, 33-38. <https://www.ks.uiuc.edu/Research/vmd/current/ug.pdf>
182. Evans D., Wennerstrom H. (1994). The Colloidal Domain: Where Physics, Chemistry, Biology, and Technology Meet. N.Y. Wiley, 2. 672
183. Dzwinel W., Alda W., Kitowski J., Moscinski J., Wcislo and Yuen, D. (1995). Macro-Scale simulation using molecular dynamics method, *Molecular Simulation*, 15, 343-360. <https://doi.org/10.1080/08927029508022347>
184. Herrmann J. (1999). The importance of computer simulations of granular flow, *Computing in Science and Engineering*, 72–73.
185. Dzwinel W., Yuen L.A. (2000). A two-level, discrete particle approach for large-scale simulation of colloidal aggregates. . *International Journal of Modern Physics C* 11(5). 1037–1061. https://doi.org/10.1142/S0129183100000882?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate
186. Dzwinel W., Yuen L.A. (2000). Matching macroscopic properties of binary fluids to the interactions of dissipative particle dynamics. *International Journal of Modern Physics C*, 11(1), 1-25. https://doi.org/10.1142/S012918310000002X?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate
187. Oliveira M.C., Iten M., Matos A. (2022). Review of Thermochemical technologies for water and energy integration systems: Energy Storage and Recovery. *Sustainability*, 14(12), 7506. <https://doi.org/10.3390/su14127506>

188. Sarbu I., Sebarchievici C. (2018). A comprehensive review of thermal energy storage. *Sustainability*, 10, 191. <https://doi.org/10.3390/su10010191>
189. Efficient compact modular thermal energy system storage. (2024). D2.1 – State of the Art of TES in Europe. Ref. Ares(2024)2334592 <https://echo-europroject.eu/wp-content/uploads/2025/01/State-of-the-Art-of-TES-in-Europe.pdf>
190. Dincer, I., Rosen M. (2002). Thermal Energy Storage: Systems and Applications. Wiley. https://www.academia.edu/22853769/Thermal_energy_storage
191. Dincer, I., Rosen, M.A. (2010). Thermal Energy Storage: Systems and Applications, 2nd Edition, Wiley. 620. <https://scribd.com/document/906942074/Thermal-Energy-Storage-Systems-and-Applications-Second-Edition-Ibrahim-Dincer-updated-2025>
192. Du, K., Eames, P., Kaiser, J., Calautit, S., Wu, Y. (2020). A state-of-the-art review of the application of Phase Change Materials (PCM) in Mobilized-Thermal Energy Storage (M-TES) for recovering lowtemperature Industrial Waste Heat (IWH). *Renewable Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.057>
193. Демченко В.Г., Коник А.В., Хоменко М.В. (2023). Огляд і обґрунтування вибору теплоаккумуляційного 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.
194. Scientific Opinion on the reevaluation of microcrystalline wax (E 905) as a food additive. (2013). *EFSA Panel on Food Additives and Nutrient Sources added to Food (ANS)* <https://doi.org/10.2903%2Fj.efsa.2013.3146>
195. Білецький В.С. (2007). Мала гірнича енциклопедія. ISBN 57740-0828-2у, 3(2), 670.

196. Liu J., Huang Z., Fan M., Yang J., Xiao J., Wang Y. (2022). Future energy infrastructure, energy platform and energy storage. *Nano Energy*, 104 (A) <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107915>
197. Alhaja M., Hassanb A., Darwishb M., Al-Ghamdia S. (2017). A techno economic review of solar-driven multi-effect. *Desalination and Water Treatment* <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.21297>
198. Алексеєнко Ф.М., Бабич І.А., Дмитренко Л.І., Мегедь О.Г., Нестероводський В.А., Савченко Я.М. та ін. (1966). Виробнича енциклопедія бджільництва. *Урожай*, 442.
199. Перцев І.М. (2010). Віск жовтий. Фармацевтична енциклопедія. 2-ге вид., переробл. і доповн., *МОПІОН*, 1632.
200. Саранчук В.І., Ільяшов М.О., Ошовський В.В., Білецький В.С. (2008). Хімія і фізика горючих копалин. *Східний видавничий дім*, 600 с. [ISBN 978-966-317-024-4](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107915).
201. Деркач Ф.А.(1968). Хімія. *Львівський університет*, 312.
202. Бондаренко В.І. та ін (2015). Газогідрати. Гідратоутворення та основи розробки газових гідратів: Монографія. *Літограф*, 219.
203. Guthrie F. (1884). LII. On eutexia. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. 5th series.* 17 (108): 462—482. <https://doi.org/10.1080/14786448408627543>
204. Киридон А.М. та ін. (2018-2025). Евтектика. Велика українська енциклопедія, *ДНУ «Енциклопедичне видавництво»*, [ISBN 978-617-7238-39-2](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107915).
205. 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>

206. ДБН В.2.5-39: 2008, Зовнішні мережі та споруди. Теплові мережі, Київ, Мінрегіонбуд України, 2009.

207. Наказ Мінрегіонбуд України "Про затвердження Технічного регламенту енергетичного маркування водонагрівачів, баків-акумуляторів та комплектів з водонагрівача і сонячного обладнання" від 19.04.2019 № 100.

208. Галузевий нормативний документ 34.21.522-2004 Резервуари сталеві вертикальні циліндричні для зберігання рідкого палива і води. Конструкції будівельні. Інструкція з експлуатації. Відкрите акціонерне товариство з пуску, налагодження удосконалення технології та експлуатації електростанцій і мереж "ЛьвівОРГРЕС"

209. Марчук Г.І. Агошков В.І. (1981). Введення в проєкційно-сіткові методи. *Наука*, 416.

210. Зенкевич О. (1975) Методи кінцевих елементів в техніці. *Мир*. – 1975. – 541с.

211. Арзамасов Б.Н. (1990). Конструкційні матеріали: довідник. *Машиностроение*, 687 .

212. Писаренко Г.С., Квітка О.Л., Уманський Е. С. (2004). Опір матеріалів: підруч. 2-ге вид., допов. і переробл. Вища школа, 655.

213. Бабенко А.Е., Бобырь Н.И., Бойко С.Л., Боронко О.А. (2005). Застосування та розвиток методу покоординатного спуску в задачах визначення напружено-деформованого стану при статичних та вібраційних навантаженнях. Інрес, 264с.

214. ДБН А.2.2-3-2014 «Склад та зміст проєктної документації на будівництво»;

215. ДБН В.2.5-67-2013 «Опалення вентиляція та кондиціонування»;

216. ДСТУ Б А.2.4-4:2009 «Основні вимоги до проєктної та робочої документації»

217. 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>

218. 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>

219. Багатофункціональний GSM – контролер ОКО-PRO-X [[Електронний ресурс]. <https://xn--j1ahb.xn--j1amh/ohrannaya-signalizaciya/gsm-dozvonshchiki/oko-pro-x/>

220. Багатофункційний лічильник SKYLAR INT [Електронний ресурс]. <https://antap.kiev.ua/goods/nemetskiy-vychislitel-tepla-scylar-int-8/>

221. Мікропроцесорний пристрій TRITON 6004TC з комутаційним модулем TRITON C37 [Електронний ресурс]. <https://terex.kiev.ua/index.php/izmeriteli-temperatury-napryazheniya/termopara-triton-6004tc.html>

222. Croda International Plc, <https://www.croda.com/en-gb/contact-us>
<https://www.croda.com/en-gb/contact-us>

223. Демченко В.Г., Гронь С.С., Погорелова Н.Д. (2019). Конструкторський розрахунок мобільного теплового акумулятора. *Теплофізика та теплоенергетика*, 41(4), 35-43. <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2019.5>

224. Демченко В.Г. (2020). Дослідження непродуктивних втрат теплоти в теплових мережах та обґрунтування нового способу транспортування теплоносія. <https://www.researchgate.net/publication/325260308>

225. Кармазін О.О. (2019). Балансова надійність електро-енергетичних систем в умовах зростання частки відновлюваної енергетики : дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук: 05.14.08. Київ, 143 с.

226. Укренерго. Методологія, методи та засоби проведення досліджень з підготовки документу «Звіт з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей». 2018.

https://ua.energy/wpcontent/uploads/2019/04/ZvitAdekvatnostiGenPotuzhnostej_31_03_2019.pdf

227. За рік Україна збільшила виробництво електроенергії з ВЕД на 5,5%. *Агробізнес сьогодні*. <http://agrobusiness.com.ua/agrobusiness/item/18488-za-rik-ukrainazbilshyla-vyrobnytstvo-elektroenerhii-z-ved-na-55protsent.html>

228. Denholm P., King J.C., Kutcher C.F., Wilsonc P.H. (2012). Decarbonizing the electric sector: Combining renew able and nuclear energy using thermal storage. *Energy Policy*, 44, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.01.055>.

229. Beckman G., Gilly P. (1987). Thermal energy accumulation, *World*, 272.

230. Demchenko V. G., Gron S. S., Pogorelova N. D. (2019), “Design calculation of mobile heat accumulator”, *Thermophysics and thermal power engineering*, 41 (4), 35–43, <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2019.5>.

231. 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»*, Київ, 32-34.

232. Демченко В.Г, Демченко В.В., Вербенський В.Г., Смерницький Д.В., Рябий С.М., Марченко О.Г. (2023). Усунення загроз системам критичної інфраструктури із застосуванням мобільних теплових акумуляторів. *Видавництво Людмила*. Київ, 126 с.

233. Лаппо І.М., Добришкін Ю.М., Геращенко М.О., Червотока О.В., Сокоринська Н.В. (2019). Проблемні питання нормативно-технічного забезпечення проведення випробувань зразків озброєння та військової техніки.

Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, 2. ISSN 2706-7386, <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.2.2019.15Б>

234. Військові стандарти, що прийняті у рамках Програми робіт із військової стандартизації на 2021–2023 роки, https://www.mil.gov.ua/content/mil_standard/List_of_mil_standarts_2021_2023.pdf

235. Mecoser Sistemi S.p.A. Produkcja kontenerów. Ancora Corporation Ltd. Sp. z o.o. <https://ancoracorp.com/oferta/produkcja-kontenerow>

ДОДАТОК А

ЗАТВЕРДЖЕНО

Директор Інституту технічної теплофізики
НАН України
Академік НАН України

Юрій Сісаків
«18» 12 2023

ЗАТВЕРДЖЕНО

Декан Інженерно-хімічного факультету
КПІ

ім. І. Сікорського
д.т.н., проф.

Євген Панов
«18» 12 2023

Акт впровадження результатів науково-дослідної роботи

Ми, що нижче підписалися, представники від Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», виконуючий обов'язки завідувача кафедри Машинобудування та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв (МАХНВ) к.т.н., доцент Степанюк А.Р., д.т.н., с.н.с. Іванюк Г. К. та від Інституту технічної теплофізики НАН України завідувач підділу ПТЕТУ, чл.-кор. НАН України, д.т.н., професор Аараменко А.А., завідувач лабораторії ПТТ, с.н.с., к.т.н. Демченко В.Г. та провідний науковий співробітник лабораторії ПТТ, к.т.н., с.н.с. Котик А.В. склали даний акт про те, що у навчальному процесі кафедри МАХНВ при підготовці фахівців за спеціальністю «Галузеве машинобудування» використовуються наукові результати, які отримано при виконанні відомої тематики І.7.1.894 «Розвиток наукових засад теплової взаємодії будівлі з довкіллям та підвищення її енергоефективності на основі застосування інтелектуальних систем енергозбереження», за якою розроблено методикку моделювання процесів теплообміну в «тепловому ядрі», заповненого теплоаккумуляційним матеріалом з фазовим переходом, що застосовуються в теплових акумуляторах змісного типу. Отримані аналітичні результати було підтверджено комплексними експериментальними дослідженнями, що продемонстрували збіжність отриманих даних в межах 5%.

Результати НДР використовуються у навчальному процесі під час проведення лекційних, практичних та лабораторних занять:

- бакалаврам за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії» для дисципліни «Спеціальні методи термічної обробки»;
- магістрам за освітньою програмою «Інженіринг та комп'ютерно-інтегровані технології проектування інноваційного галузевого обладнання» для дисципліни «Інженіринг інноваційних технологій та обладнання».

Впровадження результатів НДР дозволить здобувачам вищої освіти отримати поглиблені актуальні знання, систематизувати та закріпити досвід теоретичних та

експериментальних досліджень тепломасообмінних процесів при створенні сучасних енергоефективних технологій в різних галузях виробництва.

Від ІТТФ НАН України:

Завідувач відділу ТГЕТУ,
чл.-корр. НАН України, д.т.н., професор

 Андрій АВРАМЕНКО

Завідувач лабораторії ПТТ,
с.н.с., к.т.н.

 Володимир ДЕМЧЕНКО

Провідний науковий співробітник
лабораторії ПТТ, с.н.с., к.т.н.

 Аліна КОНИК

Від НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»:

В.о. завідувача кафедри МАХНВ
к.т.н., доцент

 Андрій СТЕПАНОВ

Професор кафедри МАХНВ
д.т.н., с.н.с.

 Георгій ІВАНІЦЬКИЙ

ДОДАТОК Б

ЗАТВЕРДЖЕНО

Директор Інституту технічної
теплофізики
НАН України,
Академік НАН України



Юрій Сисюк

2024

ЗАТВЕРДЖЕНО

Декан Інженерно-хімічного факультету
КПІ ім. І. Сікорського
д-р. фіз.-мат. наук, проф.



Світлан Павлов

2024

Акт впровадження результатів науково-дослідної роботи

Ми, що нижче підписалися, представники від Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», завідувач кафедри Машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв (МАХНВ) к.т.н., доцент Степанюк А.Р., д.т.н., та від Інституту технічної теплофізики НАН України завідувач відділу ТТЕТУ, чл.-кор. НАН України, д.т.н., професор Авраменко А.А., та провідний науковий співробітник лабораторії ПТТ, к.т.н., с.н.с. Кошик А.В. склали даний акт про те, що у навчальному процесі кафедри МАХНВ при підготовці фахівців за спеціальністю «Галузеve машинобудування» освітня програма «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії» використовуються наукові результати, які отримано при виконанні відомчої тематики 1.7.1.894 «Розвиток наукових засад теплової взаємодії будівлі з довкіллям та підвищення її енергоефективності на основі застосування інтелектуальних систем енергозбереження», за якою розроблено методику моделювання стаціонарного і нестаціонарного комплексного теплообміну в оптично густому середовищі при плівковому кипінні, що застосовуються в теплових акумуляторах змісного типу. Отримані аналітичні результати було підтверджено експериментальними дослідженнями даного типу акумуляторів, що продемонстрували схожість отриманих даних в межах 5...10%.

Результати НДР використовуються у навчальному процесі під час проведення лекційних, практичних та лабораторних занять з кредитного модуля:

- «Процеси та обладнання хімічної технології.-1. Теплові процеси», яка викладається бакалаврам, що навчаються за ОПП «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії»;
- під час курсового проектування, дипломного проектування та виконання бакалаврських проектів.

Впровадження результатів забезпечить якісне формування наступних програмних результатів навчання:

РН 1. Знати і розуміти засади технологічних, фундаментальних та технічних наук, що лежать в основі інженерії обладнання хімічної і споріднених технологій.

РН 19. Розуміти фізичну сутність явищ, механізмів перетворень при проведенні процесів в обладнанні хімічної і споріднених технологій, застосовувати математичний апарат для кількісних розрахунків, на основі яких обирати параметри обладнання та режим його роботи.

Впровадження результатів НДР дозволить здобувачам вищої освіти отримати поглиблені актуальні знання, систематизувати та закріпити досвід теоретичних та експериментальних досліджень тепломасообмінних процесів при створенні сучасних енергоефективних технологій в різних галузях виробництва.

Від ПТФ НАН України:

Завідувач відділу ПТЕТУ,
чл.-корр. НАН України, д.т.н., професор

Андрій АВРАМЕНКО

Провідний науковий співробітник
лабораторії ПТТ, с.н.с., к.т.н.

Аліна КОНИК

Від ІТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»:

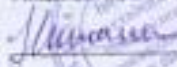
Завідувач кафедри МАХНВ
к.т.н., доцент

Андрій СТЕПАНЮК

ДОДАТОК В

ЗАТВЕРДЖЕНО

Директор Інституту технічної теплофізики
НАН України
Академік НАН України

 Юрій ШЧЕГЕЛН
2024

ЗАТВЕРДЖЕНО

Декан Інженерно-хімічного факультету
КПІ ім. І. Сікорського
д.т.н., проф.

 Степан ПАНОВ
2024

Акт впровадження результатів науково-дослідної роботи

Ми, що нижче підписалися, представники від Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», завідувач кафедри Машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв (МАХНВ) к.т.н., доцент Степанюк А.Р., науковий керівник кафедри МАХНВ, д.т.н., професор Корнієнко Я.М., та від Інституту технічної теплофізики НАН України завідувач відділу ТТЕТУ, чл.-кор. НАН України, д.т.н., професор Азаренко А.А., завідувач лабораторії ПТТ, к.т.н., с.н.с. Демченко В.Г. та провідний науковий співробітник лабораторії ПТТ, к.т.н., с.н.с. Татархінова А.В. склали даний акт про використання у навчальному процесі кафедри МАХНВ наукових результатів, які отримано при виконанні відомчої тематики І.7.1.89 «Розвиток наукових засад теплової взаємодії будівлі з довкіллям та підвищення її енергоефективності на основі застосування інтелектуальних систем енергозбереження». У результаті досліджень розроблено методику моделювання нестационарного осцилюючого потоку рідини у плоских та циліндричних каналах, що застосовуються в теплових акумуляторах емісійного типу та отримано аналітичні рішення профілів швидкості та втрати (продуктивності), які було отримано з урахуванням перетворення Лапласа, аналітичні дані порівнювалися з чисельними результатами, одержаними за допомогою IBM.

Результати НДР використовуються у навчальному процесі під час підготовки:

1. Здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії»:
 - у дисципліні ПО 12.1 Процеси та обладнання хімічної технології. Частина 1 Теплові процеси;
 - під час курсового проектування, дипломного проектування.
2. Здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за освітньою програмою «Інженіринг та комп'ютерно-інтегровані технології проектування інноваційного галузевого обладнання»:
 - у дисципліні ПО4 Інженіринг інноваційних технологій та обладнання;
 - під час курсового проектування, та виконання магістерської дисертації.
3. Здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти за освітньою науковою програмою «Галузеве машинобудування»:
 - у дисципліні ЗО 5 Перспективні напрями розвитку енерго- та ресурсоефективних процесів, обладнання та технологій;
 - під час виконання дисертації доктора філософії.

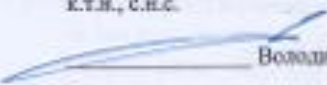
Впровадження результатів НДР дозволяє здобувачам вищої освіти отримати знання про сучасні підходи до процесів теплової взаємодії об'єктів з довкіллям та підвищення їх енергоефективності на основі застосування інтелектуальних систем енергозбереження та ознайомитися з новітніми напрямки моделювання цих процесів.

Від ІТТФ НАН України:

Завідувач відділу ТГЕТУ,
чл.-корр. НАН України, д.т.н., професор

 Андрій АВРАМЕНКО

Завідувач лабораторії ПТТ,
к.т.н., с.н.с.

 Володимир ДЕМЧЕНКО

Провідний науковий співробітник
лабораторії ПТТ, с.н.с., к.т.н.

 Аліна ТАТАРУКОВА

Від КІП ім. І. Сікорського:

Завідувач кафедри МАХНВ
к.т.н., доцент

 Андрій СТЕПАНЮК

Науковий керівник кафедри МАХНВ,
д.т.н., професор

 Ярослав Корнішко

ДОДАТОК Г



АКТ

впровадження наукових результатів

Результати досліджень мікроструктури теплоаккумуляційного матеріалу на основі водорозчинних високомолекулярних вуглеводнів рослинного походження впроваджено у теплових акумуляторах змісного типу встановлених у дослідному зразку мобільного теплового акумулятора МТА-0,5MWt (договір №ДЗ /80-2019 від 25 вересня 2019 р. «Розроблення системи зберігання та мобільного транспортування теплової енергії»). Дослідження проводили способом світлової мікроскопії методом світлого поля з використанням об'єктивів EC Plan-Neofluar зі збільшенням 40x і 100x в Центрі колективного користування науковими приладами НАН України на мікроскопі CARL ZEISS Axio Imager Z1m співробітником відділу тепломасообміну в дисперсних системах (ТДС) ІТТФ НАН України.

Копії протоколів додаються:

- протокол № 2/2024 випробувань по визначенню теплоспоживності зразків теплоносія, квітень 2024.

Завідувач лабораторії ПТТ, с.н.с., к.т.н.  Володимир ДЕМЧЕНКО

Пров.н.с. лабораторії ПТТ, с.н.с., к.т.н.  Аліна КОНИК



ПРОТОКОЛ №2/2024

досліджень мікроструктури зразків теплоносія

м. Київ

ЧЕРВЕНЬ 2024 р.

1. **Замовник:** Лабораторія процесів та технологій теплозабезпечення ІТТФ НАН України.

2. **Виконавець:** Лабораторія теплофізичних основ ДІВЕ ІТТФ НАН України.

3. **Об'єкт досліджень:** зразки теплоносія у кількості 3 шт., що надані та промарковані Замовником як «№ 2», «№ 3» і «№ 4».

4. **Методика досліджень.** Мікроструктуру попередньо висушених Замовником зразків теплоносія досліджували способом світлової мікроскопії методом світлого поля використовуючи об'єктиви зі збільшенням 40x і 100x. Отримані зображення зберігали в цифровому вигляді у файлі формату .jpg.

5. **Прилади та обладнання.** Для визначення мікроструктури наданих Замовником зразків теплоносія нанесених на предметне скло і висушених в лабораторії Замовника використали універсальний моторизований світловий мікроскоп Axio Imager Z1m виробництва CARL ZEISS оснащеного об'єктивами з плоским полем зображення EC «Plan-Neofluar» 40x/0,75 і 100x/1,30 Oil. Зображення отримували за допомогою цифрової камери Zeiss AxioCam MRc 5 (5MP 2584×1936 12-Bit Cooled CCD Microscope Camera C-Mount).

6. **Результати дослідження мікроструктури теплоаккумуляційного матеріалу.**

Результати дослідження мікроструктури кожного зразка теплоаккумуляційного матеріалу наведені на рисунках 1-6 (Додаток А)

Примітки:

- 1) Протокол випробувань стосується тільки зразків наданих Замовником для дослідження.
- 2) Зразки надані Замовником у вигляді висушених краплин на предметному склі.
- 3) Залишковий вміст вологи в наданих зразках відповідав потребам Замовника.

ВІД ЗАМОВНИКА:

Зав. лабораторії ПТТ ІТТФ НАН України,
к.т.н., с.н.с.



В.Г. Демченко

Провідний науковий співробітник
лабораторії ПТТ ІТТФ НАН України,
к.т.н., с.н.с.



А.В. Коник

ВІД ВИКОНАВЦЯ:

Зав. відділом ТДС ІТТФ НАН України,
д.т.н., проф.



О.М. Ободович

Зав. лабораторії теплофізичних основ ДІВЕ,
провідний науковий співробітник відділу ТДС
ІТТФ НАН України, к.т.н., с.н.с.



Б.Я. Целень



Рисунок 1 – Мікроструктура зразка № 2 теплоасумуляційного матеріалу
(об'єктив EC «Plan-Neofluar» 40x/0,75)

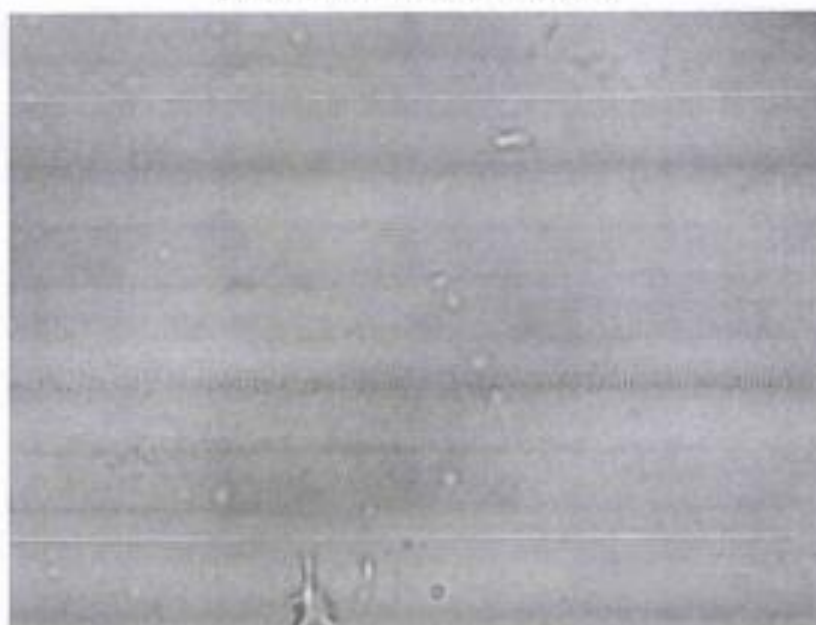


Рисунок 2 – Мікроструктура зразка № 2 теплоасумуляційного матеріалу
(об'єктив EC «Plan-Neofluar» 100x/1,30 Oil)

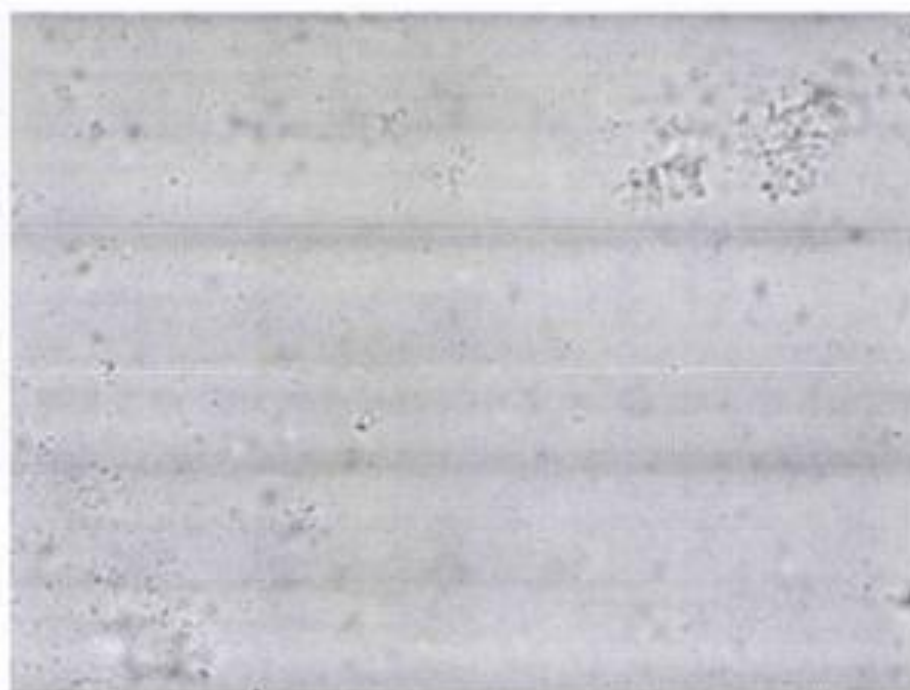


Рисунок 3 – Мікροструктура зразка № 3 теплоаккумуляційного матеріалу
(об'єктив EC «Plan-Neofluar» 40x/0,75)



Рисунок 4 – Мікροструктура зразка № 3 теплоаккумуляційного матеріалу
(об'єктив EC «Plan-Neofluar» 100x/1,30 Oil)

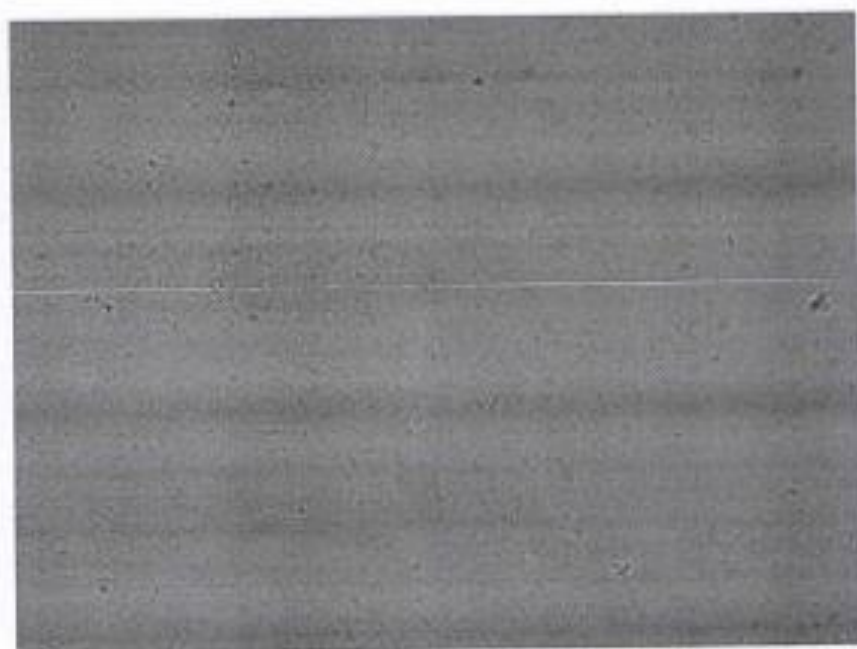


Рисунок 5 – Мікроструктура зразка № 4 термопластичного матеріалу
(об'єктив EC «Plan-Neofluar» 40x/0,75)

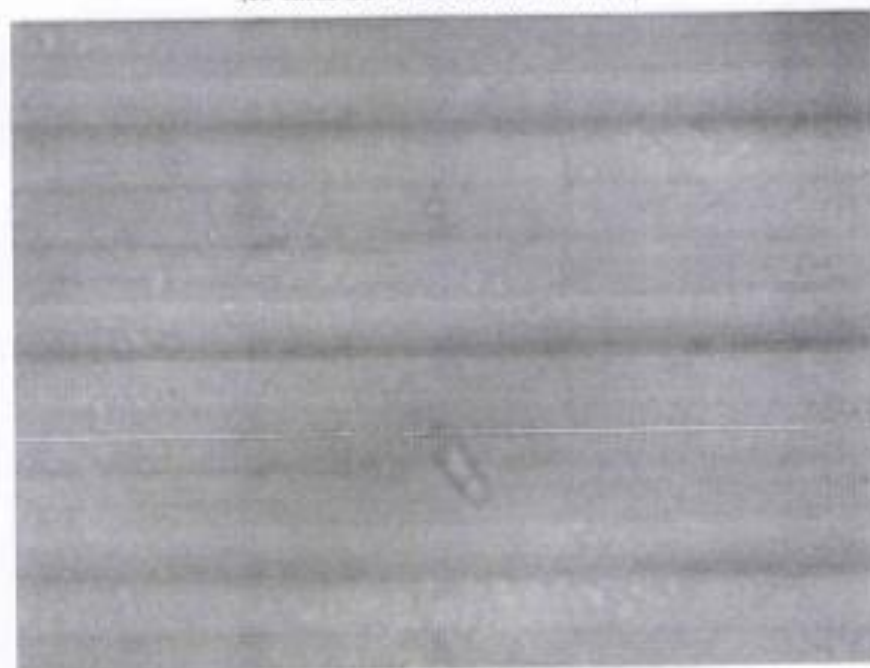
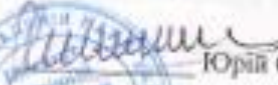


Рисунок 6 – Мікроструктура зразка № 4 термопластичного матеріалу
(об'єктив EC «Plan-Neofluar» 100x/1,30 Oil)

ДОДАТОК Д

ЗАТВЕРДЖЕНО

Директор Інституту технічної
теплофізики НАН України,
академік НАНУ


Юрій СНЕЖКІН
«22» листопада 2021р.

ЗАТВЕРДЖЕНО

Декан Інженерно-хімічного
факультету КПІ ім. І.Сікорського,

д.т.н., проф.

Евген ПАНОВ
«22» листопада 2021р.

АКТ

Ми, які нижче підписалися, представники: від Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», виконуючий обов'язки завідувача кафедри Машин і апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв (МАХНВ) к.т.н., доцент Степанюк А.Р., д.т.н., професор Корнієнко Я.М., та від ІТТФ НАН України зав. відділу ПТЕТУ ІТТФ НАНУ, чл.-корр. НАНУ, д.т.н., професор Авраменко А.О., зав. лабораторії ПТТ, ІТТФ НАН України, к.т.н., с.н.с. Демченко В.Г., пр. н.с. лабораторії ПТТ, ІТТФ НАН України, к.т.н., с.н.с. А.В. Коник, склали даний акт про те, що у навчальному процесі підготовки фахівців за спеціальністю «Галузеве машинобудування», освітня програма «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії» використовуються наукові результати відомчою тематикою 1.7.1.894 «Розвиток наукових засад теплової взаємодії будівлі з довкіллям та підвищення її енергоефективності на основі застосування інтелектуальних систем енергозабезпечення», за якою розроблено засади та підходи застосування енергоефективних методів розрахунку теплових акумуляторів, а також методику розрахунку теплових втрат в системах теплотзабезпечення.

Результати НДР використовуються в навчальному процесі під час проведення лекційних, практичних та лабораторних занять з дисципліни:

- «Спеціальні методи термічної підготовки», яка викладається бакалаврам, що навчаються за а ОПІ «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії».

- Під час курсового проектування, дипломного проектування та виконання магістерської дисертації.

Впровадження результатів за НДР навчальним процесом забезпечується розділами конспектів лекцій з дисципліни:

- «Спеціальні методи термічної підготовки», яка викладається бакалаврам, що навчаються за а ОПП «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії».

Впровадження результатів за забезпечить більш якісне формування наступних програмних результатів навчання:

- розробляти експериментальні установки та використовувати експериментальні дослідження.

Впровадження результатів дозволяє здобувачам вищої освіти отримати, поглибити, систематизувати та закріпити досвід з теоретичних та експериментальних досліджень тепломасообмінних процесів при створенні інноваційних технологій в різних галузях виробництва.

Від ІТТФ НАН України

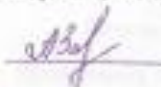
Зав. відділу ТТЕТУ ІТТФ НАНУ,
чл.-корр. НАНУ, д.т.н., професор,

 Андрій АВРАМЕНКО

Зав. лабораторії ПТТ, ІТТФ НАН
України, к.т.н., с.н.с.

 Володимир ДЕМЧЕНКО

Пр.н.с. лабораторії ПТТ, ІТТФ НАН
України, к.т.н., с.н.с.

 Аліна КОНИК

Від КПІ ім. І.Сікорського

В.о. зав. каф. МАХНВ, к.т.н., доцент

 Андрій СТЕПАНЮК

Професор каф. МАХНВ,
д.т.н., професор

 Ярослав КОРНИШЕНКО

ДОДАТОК Е



ТОВ «Завод енергетичного обладнання «ДАН»

08113, Україна, Київська обл., Києво-Святошинський р-н, с. Петрушки, вул. Миру, 25-в
ЄДРПОУ 23242734, р/р UA613510050000026000561363100 в ПАТ «УкрСиббанк» м. Київ
МФО 351005, ІПН 232427310138

«Проектування та виготовлення блочного інди- відуального теплопункту (ІТП) для мобільного теплового акумулятора (МТА)»

Робочий проект

Пояснювальна записка та креслення

Загальні положення
ДЗ/10-2019/921.ЗП
Тепломеханічна частина
ДЗ/10-2019/921.ТМ
Електротехнічні рішення
ДЗ/10-2019/921.ЕТР

Київ-2019 р.

Позначення	Найменування	Примітка
<i>ДЗ/10-2019/921.З</i>	Зміст	стор. 3
<i>ДЗ/10-2019/921.ПД</i>	Підтвердження ГП	стор. 4
<i>ДЗ/10-2019/921.ВУ</i>	Відомості про учасників проектування	стор. 5
<i>ДЗ/10-2019/921.ЗП</i>	Загальні положення	стор. 8
<i>ДЗ/10-2019/921.ТМ</i>	Тепломеханічна частина	стор. 13
<i>ДЗ/10-2019/921.ЕТР</i>	Електротехнічні рішення	стор. 19
	Вихідні дані для проектування	
	Завдання на проектування	стор. 6
	Додатки	стор. 20
	Креслення	стор. 33

						<i>ДЗ/10-2019/921.З</i>			
						«Проектування та виготовлення блокового індивідуального теплоту- пункту (ІТП)» Зміст	Станд	Архив	Архив
Зм.	Клас.	Зм.	Відок.	Відок.	Дата		РП	1	1
ГП		Борислав			12.19		ТОВ «Завод енергетичного обладнання «ДАН»		
Розроб		Розра			12.19				
Перевір		Змін			12.19				
Начальн.		Богдан			12.19				

Додаток 1
До договору № ДЗ/10-2019/921
Від «04» листопада 2019р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор Інституту технічної
теплофізики НАН України
академік НАН України
Ю.Ф.Сисакін
_____ 2019р.

ЗАВДАННЯ НА ПРОЕКТУВАННЯ

*«Проектування та виготовлення блочного індивідуального тепловипуску
(ГТП) для мобільного теплового акумулятора (МТА)»*

№ з/п	Найменування питання	Зміст основних даних та вимог
1	2	3
1	Найменування проектних робіт	Проектування та виготовлення блочного індивідуального тепловипуску (ГТП) для мобільного теплового акумулятора (МТА)
2	Підстава для проектування	Договір №ДЗ/10-2019/921 від «04» листопада 2019р.
3	Дані про Замовника	Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057
4	Дані про Виконавця	ТОВ «Завод енергетичного обладнання «ДАН» 08113, Київська обл., Києво-Святошинський р-н, с. Петрушки, вул. Миру, 25-а
5	Стадійність проектування	Робочий проект
6	Потужність ГТП. Технічні характеристики	Номінальна теплопродуктивність складає 0,1 МВт. Діапазон регулювання теплопродуктивності по відношенню до номінальної – 40-100%. Робочий тиск води – не більше 0,6 МПа. Максимальна температура води – не більше 115 °С. Мінімальна температура води – не менше 40 °С. Номінальний гідравлічний опір за розрахунковим перепадом температури (t=25°С) – 50 кПа. <u>Конструктивні показники</u> Маса ГТП– не більше 100 кг. Габаритні розміри: довжина не більше 1700 мм ширина не більше 700 мм висота, не більше 2000 мм <u>Показники надійності</u> Середня безвідмова робота – не менше 6000 годин Середній термін служби – не менше 10 років <u>Показники ергономічності</u> Температура огорожуючих поверхонь ГТП – не більше 35 °С <u>Показники технологічності конструкції</u>

1	2	3
		Питома матеріаломісткість – не більше 6,0 т/МВт Питома металомісткість – не більше 5,0 т/МВт Питома споживання електроенергій при експлуатації – не більше 3,0 кВт/МВт <u>Показники ресурсозбереження</u> Коефіцієнт корисної дії – не менше 85 % <u>Показники безпеки</u> Рівень звуку в контрольних точках – не більше 80 дБ Час спрацювання приладів захисту – не більше 2 с
7	Основні вимоги до технічних рішень, прийнятих в проєкті	Для виготовлення елементів ГТП, які працюють під тиском води, повинні застосовуватись сталі за ГОСТ 19903-74 та труби за ГОСТ 8734-75 Пересуваний ГТП повинен мати уніфіковану конструкцію розраховану на постійне транспортування автомобіляним транспортом та експлуатацію при пониженнях зовнішніх температурах. Конструкція ГТП повинна забезпечувати надійну роботу при ручному та/або автоматичному режимах експлуатації. Експлуатаційні та споживчі характеристики ГТП повинні відповідати державним нормам та стандартам України. Виготовлення ГТП і його комплектація базуються на прогресивних енергоощадних технологіях із взаємозамінними деталями. Уніфікація окремих вузлів та комплектуючих дозволяє на базі дослідного зразка ГТП побудувати гнучку теплову та гідрравлічну схему, яка може використовуватися для подальшого будівництва МТА та з кращими характеристиками у порівнянні з існуючими аналогами. ГТП повинен бути конкурентоздатним на вітчизняному і світовому ринку аналогічної продукції
8	Склад та зміст робочого проєкту	Робочий проєкт має містити основний розділ «Пояснювальна записка» Дані книги повинні містити: - пояснювальну записку; - робочі креслення (принципова теплова схема); - специфікацію обладнання, виробів та матеріалів для ГТП. Структура документації погоджується з Замовником додатково.
9	Основні умови	Проектну документацію надати у 4-х примірниках.

РОЗРОБИВ:

Керівник проєктного відділу
ТОВ «Завод енергетичного обладнання «ДАНО»

І.К. Божко

ПОГОДЖЕНО:

Головний інженер проєктів
ТОВ «Завод енергетичного обладнання «ДАНО»

М.В. Барановський

Науковий керівник
Зав.лаб.ПІТТ відділу ТІЕТУ,к.т.н.

В.Г.Демченко

1. Загальні положення

1.1 Вихідні дані для проектування

Даний робочий проект розроблено ТОВ «Завод енергетичного обладнання «ДАН» на підставі Договору № ДЗ/10-2019/921 від «04» листопада 2019 р. та завдання на проектування: «**Проектування та виготовлення блочного індивідуального теплопункту (ІТП) для мобільного теплового акумулятора (МТА)**».

Розрахунок та підбір основного та допоміжного обладнання проводився згідно вихідних даних, наданих Замовником:

№	Найменування параметру	Значення	Од. виміру
1	Теплове навантаження на систему опалення	100	кВт
2	Температура у подавальному трубопроводі системи теплопостачання споживача	50	°C
3	Температура у зворотному трубопроводі системи теплопостачання споживача	30	°C
4	Температура теплоносія після акумулятора	90	°C
5	Температура теплоносія перед акумулятором	50	°C

В даному об'єкті для системи теплопостачання прийнята незалежна схема приєднання до джерела теплопостачання.

Проект розроблено у відповідності до діючих норм і правил:

- ДБН А.2.2-3-2014 «Склад та зміст проектної документації на будівництво»;
- ДБН В.2.5-67-2013 «Опалення вентиляція та кондиціонування»;
- ДСТУ Б А.2.4-4:2009 «Основні вимоги до проектної та робочої документації».

						ДЗ/10-2019/921.ЗП			
						«Проектування та виготовлення блочного індивідуального теплопункту (ІТП)» Загальні положення	Стаття	Аркуш	Архів
ГП		Борислав			12.19		РП	1	5
Розробив		Марко			12.19		ТОВ «Завод енергетичного обладнання «ДАН»		
Перевірив		Зітін			12.19				
Начальн.		Бажко			11.19				

1.2 Коротка характеристика

Проектом «Проектування та виготовлення блочного індивідуального теплопункту (ТПП) для мобільного теплового акумулятора (МТА)» передбачено розроблення робочої проектно-конструкторської документації та виготовлення дослідного зразка індивідуального теплового пункту (ТПП), тепловою потужністю 0,1 МВт, який працює в складі з мобільним тепловим акумулятором (МТА).

Мобільні теплові акумулятори можуть бути легко інтегровані в інноваційний концепт Smart Grid системи тепlopостачання. Відмінністю мобільних теплоакумуляторів, від широко розповсюджених стаціонарних, є наявність кумулятивного блоку, вбудованого блокового теплового пункту, який поділяє контури споживача й акумулятора, а також вузла приєднання МТА до джерел теплоти й споживача. МТА розташований в стандартному контейнері, який призначений для транспортування будь-яким видом транспорту. Впровадження у виробництво пересувних МТА з ІТП надасть змогу залучення в енергетичний сектор місцевих видів палива, вторинних енергетичних ресурсів та поновлюваних джерел енергії, зменшення екологічної небезпеки в межах населених пунктів, рекультивації земель, чистоту довкілля, створення нового екологічного бізнесу та конкуренції в теплоенергетичному секторі.

1.3 Дані про технічне обстеження

Індивідуальний тепловий пункт (ІТП) розташований в стандартному транспортному контейнері габаритними розмірами – Д х Ш х В 6,06 х 2,30 х 2,30 м. Контейнер за допомогою перегородки поділено на два приміщення: для ІТП та для баків-акумуляторів. Розміри приміщення для ІТП – 2,30 х 1,25 х 2,30 м.

Внесення обладнання здійснюється через входні ворота контейнеру. В ІТП постійне перебування персоналу не передбачається.

1.4 Загально-будівельні роботи

ГПН буде встановлюватися на вібропрокладках на підлогу контейнера 20 футів, яка покрита транспортною стрічкою.

						ДЗ/10-2019/921.3П	Арх.
Зн	Квал	Зн	Відом	Підпис	Дата		2

В приміщенні для індивідуального теплового пункту передбачено встановлення модульного блоку системи тепlopостачання.

1.5 Опалення та вентиляція

Опалення приміщення ІТП – за рахунок тепловиділень обладнання та трубопроводів та керамічною нагрівальною панеллю ПМК 700 Вт українського виробництва.

Існуюча вентиляція – природня, самоплинна.

1.6 Охорона праці

Даним робочим проектом передбачаються заходи, що забезпечують нормальні умови роботи та захист від травмування обслуговуючого персоналу в процесі експлуатації обладнання ІТП.

Обслуговуючий персонал запроектованого ІТП повинен керуватись «Правилами технічної експлуатації теплоісповуюючих установок и теплових сетей» та загальними нормами техніки безпеки для слюсаря, сантехніка та електрослюсаря, у тому числі:

- проводити роботи по технічному обслуговуванню модульного індивідуального теплового пункту і його окремих вузлів та виконувати усунення несправностей тільки при відключеному обладнанні (за відсутності напруги електроживлення, тиску води в магістралях);
- обладнання, технологічні трубопроводи, цитові пристрої корпуси приладів засобів автоматизації та конструкції для їх установки, металеві захисні труби та металорукави електропроводки підлягають захисному заземленню та приєднанню до окремого контуру заземлення;
- в якості заземлюючих захисних провідників використовуються провідники, спеціально призначені для цих цілей, з відповідним поперечним перерізом;
- електричний опір заземлюючого контуру не перевищує 4 Ом.

						ДЗ/10-2019/921.ЗП	Арх.
Зм.	Кільк.	Зак.	Відок.	Підпис.	Дата		3

Устаткування та обладнання, використання яких передбачено у проекті, мають сертифікати якості та відповідності вимогам санітарних і протипожежних норм України.

Беручи до уваги все вищевикладене – робимо висновок, що в індивідуальному тепловому пункті **не потребується** додаткового облаштування системи внутрішнього пожежогашіння.

1.8 Оцінка впливів на навколишнє середовище

Даний розділ робочого проекту не розроблявся, оскільки індивідуальний тепловий пункт, що є предметом цього проекту, не відноситься до категорій видів планованої діяльності та об'єктів, які можуть мати значний вплив на довкілля і підлягають оцінці впливу на довкілля, згідно Закону України № 2059-VIII «Про оцінку впливу на довкілля» від 23 травня 2017 року.

						<i>ДЗ/10-2019/921.3П</i>	Арх.
Зм.	Кільк.	Зак.	№Док.	Підпис	Дата		5

2. Тепломеханічна частина

2.1. Основні технологічні рішення

Під час розробки тепломеханічної частини проекту: «Проектування та виготовлення блочного індивідуального тепловипуку (ГВП) для мобільного теплового акумулятора (МТА)» було використано та погоджено з Замовником, принципову теплову схему для ГВП з навантаженням на систему тепlopостачання.

Загальна теплова схема умовно складається з наступних елементів:

- контуру системи тепlopостачання, що приєднується за незалежною схемою через розбірний пластинчастий теплообмінник;
- контуру мобільного теплового акумулятору.

Індивідуальний тепловий пункт – це самостійне технологічне обладнання, виготовлене в заводських умовах у відповідності до вимог технічних умов, отриманих Виробником в затвердженому порядку.

Контур системи тепlopостачання, що приєднується до джерела тепlopостачання за незалежною схемою включає в себе:

- розбірний пластинчастий теплообмінник;
- циркуляційні насоси;
- теплотічнийник SKYLAR INT 8 в комплекті з витратоміром та термopеретворювачами опору;
- запірну арматуру, фільтри та контрольні-вимірювальні прилади;
- запобіжно-схидний клапан та інше допоміжне обладнання.

Теплоносій від теплових акумуляторів надходить до модульного блока через кульовий кран і за допомогою сітчастого фільтра очищається від механічних домі-

						ДЗ/10-2019/921.ТМ			
Зм.	Клык	Зак.	Відок.	Підпис	Дата	«Проектування та виготовлення блочного індивідуального тепловипуку (ГВП)» Тепломеханічна частина	Стаття	Архив	Архив
ГОТ		Борисович			12.19		РР	1	7
Розробив		Марко			12.19		ГОВ «Завод енергетичного обладнання «ДАН»		
Перевірив		Зітін			12.19				
Н.контр.		Бажко			12.19				

Забезпечення циркуляції теплоносія відбувається за допомогою однофазних циркуляційних насосів. Керування швидкістю обертання виконується вручну. Для захисту від виникнення шуму та вібрації, при роботі насосного обладнання використовуються на трубопроводах гнучкі вставки.

Запобіжно-скадний клапан захищає систему від підвищення тиску при температурному розширенні теплоносія.

Облік тепла на потреби споживача організовано за рахунок використання теплорозподільника SKYLAR INT 8 фірми «Антан Україна», до складу якого входить обчислювач теплової енергії, витратомір, який встановлено на подавальному трубопроводі контуру споживача та термонеперетворювачі опору на подавальному та зворотньому трубопроводах зі сторони споживача.

Підживлення системи циркуляції здійснюється через дренаж, розташований на зворотному трубопроводі зі сторони споживача. Для компенсації та підтримання тиску встановлено мембранний розширювальний бак.

На подавальному і зворотному трубопроводі з боку споживача і внутрішньому контурі циркуляції встановлені датчини температури котельної води.

- вісім теплових акумуляторів;
- запірну арматуру;
- контрольно-вимірювальні прилади.

Баки-акумулятори обладнані нагрівальною спіраллю Ду32. На верхній кришці міститься люк внутрішнім діаметром 320 мм. Баки дообладнуються сердечником з матеріалом з фазовим переходом. Ємність бака заповнено рідким теплоакумуляційним складом. 4 баки підключено паралельно, 4 баки – послідовно.

						ДЗ/10-2019/921.ТМ	Арх.
Ин.	Класс.	Учак.	ИФДак.	Подпис.	Дата		2

Матеріал баків і спіралі – чорна сталь. З'єднання контуру циркуляції між баками здійснюється за допомогою труби Ду 32, на якій передбачено по 2 крани, гільзу для термометра і місце для установки манометра. В кожному баку по висоті з лицьового боку встановлено датчики температури, показники яких будуть фіксуватися концентратором вимірювань в процесі проведення досліджень. У нижній частині бака передбачено дренаж, а у верхній – автоматичний кран для спуску повітря. Також, автоматичні спускні крани повітря встановлені в верхніх точках системи циркуляції при об'їзді баків за місцем.

Перед монтажем в баки через верхній люк встановлюється сердечник, після монтажу і об'їзди бака, він заповнюється рідким теплоакumuлюючим розчином через дренаж і в процесі експлуатації розчин не змінюється. Дренажі від кожного бака індивідуальні, що дозволяє заправляти баки різними складами.

Кріплення баків в контейнері передбачено до підлоги контейнера, між собою баки з'єднуються стяжними болтами. Трубопроводи розміщуються на опорах.

Показання датчиків температури, датчика несанкціонованого доступу і протипожежної безпеки виводяться на концентратор вимірювань і від нього на GSM логер.

2.2. Трубопроводи, арматура і дренаж

В якості запірної арматури передбачено використання кульових кранів. У нижніх точках трубопроводів передбачено встановлення дренажної арматури.

Дренаж з трубопроводів та модульного ГТП виконати через дренажні воронки в систему дощової каналізації.

2.3. Підбір обладнання

2.3.1. Розрахунок пластинчастого теплообмінника

У відповідності до «Завдання на проектування» та затвердженої теплової схеми в проєкті було використано розбірний пластинчастий теплообмінник, на основі пластин фірми «Fapke».

						ДЗ/10-2019/921.ТМ	Арх.
							3
Зм.	Колос.	Зук.	Шадок.	Піднос.	Дата		

Розрахунок теплообмінника проводився за допомогою сертифікованого програмного забезпечення цієї фірми. Під час розрахунку теплообмінника був прийнятий 15% запас поверхні теплообміну, що забезпечить надійну експлуатацію теплообмінника в усіх режимах.

2.3.2. Вибір насосного обладнання

В даному проєкті були використані енергоефективні насоси фірми «Wilox».

Підбір насосів виконувався за допомогою сертифікованого програмного забезпечення цієї фірми.

Призначення	Витрата V , $\text{м}^3/\text{год}$	Напір H , м	Насос
Система тепlopостачання	3,0	27,0	MHI 206-1/E/1-230-50-2
Контур №1 (паралельне з'єднання баків)	3,0	7,82	TOP-S 25/10 EM PN6/10
Контур №2 (послідовне з'єднання баків)	3,0	13,7	TOP-S 40/15 EM PN6/10

Загальні характеристики обраних насосів наведені в технічній документації на теплофікаційні модульні блоки.

2.3.3. Визначення розрахункових витрат теплоносія та підбір теплолічильників

Облік тепла організовано за рахунок використання теплолічильника SKYLAR INT 8 фірми «Антал Україна», до складу яких входять обчислювач теплової енергії, витратомір та перетворювачі опору.

Підбір теплолічильника здійснювався шляхом порівняння розрахункових витрат теплоносія в системі тепlopостачання та не перевищення максимальної витрати згідно з паспортними значеннями.

Розрахункова витрата теплоносія:

$$G_{\text{ном}} = \frac{3,6 \cdot Q_{\text{ном}}}{C_p \cdot (t_1 - t_2)} \cdot 10^{-3} = 4,31 \text{ [м}^3/\text{год]},$$

						ДЗ/10-2019/921.ТМ	Арх.
Зм.	Колод.	Зос.	ВРдох.	Підпис.	Дата		4

Таким чином, за розрахунковими витратами теплоносія обираємо обчислювач теплової енергії SKYLAR INT 8 з витратоміром DN40, для якого номінальна витрата становить $q_{max}=10$ т/год.

До вузла обліку споживання теплової енергії включено:

- теплообчислювач SKYLAR INT 8 – 1 шт.;
- муфтовий витратомір з імпульсним виходом DN40 – 1 шт., який встановлюється на подавальному трубопроводі;
- термоперетворювачі опору типу Pt 500 – 2 шт., які встановлені на подавальному та зворотному трубопроводах.

Лічильник тепла забезпечує вимірювання, обчислення, а також індикацію на табло параметрів:

- Теплової енергії, ГДж (МВт, кВт, Гкал);
- Середня, мінімальна, максимальна витрати теплоносія в трубопроводі, м³/год, т/год;
- Головний об'єм теплоносія в трубопроводі, м³;
- Додатковий об'єм теплоносія в трубопроводі, м³;
- Температуру води в подавальному трубопроводі, °C;
- Температуру води в зворотному трубопроводі, °C;
- Різницю температур, °C;
- Часу нагрівання і простою, хв;
- Поточного часу, дати;
- Код помилок.

2.3.3. Розширювальний мембранний бак

Розширювальний мембранний бак призначений для компенсації температурного розширення теплоносія в системі. Підбір мембранного бака виконується у відповідності до Додатку Л ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціювання».

						ДЗ/10-2019/921.ТМ	Арх
Зв.	Кільк.	Док.	Відок.	Підпис.	Датум.		5

Повна водомісткість розширювального бака розраховується за формулою:

$$V_{e_{exp,min}} = (V_e + V_{WR}) \frac{P_e + 1}{P_e - P_0} = 77 \text{ дм}^3$$

де V_{WR} – резервний об'єм води, дм^3 ;

V_e – приріст об'єму води, дм^3 ;

P_0 – початковий проектний тиск теплоносія, бар;

P_e – тиск спрацювання запобіжного клапану ($P_e = 5,5$ бар).

Резервний об'єм (20% від приросту об'єму теплоносія V_e):

$$V_{WR} = 0,2 \cdot V_e = 8,7 \text{ дм}^3.$$

Приріст об'єму теплоносія V_e з використанням відносного розширення за максимальної температури теплоносія в системі:

$$V_e = e \frac{V_{system}}{100} = 42,2 \text{ дм}^3,$$

де e – коефіцієнт відносного розширення води, %, що визначається за довідковими даними додатка Л ДБН В.2.5-67:2013;

V_{system} – повна водомісткість системи дм^3 . Вона складається з місткості води в трубопроводах, опалювальних приладах, теплогенераторі та допоміжних відгалуженнях. $V_{system} = 1,9 \text{ м}^3$.

Згідно отриманої водомісткості $V_{exp,min} = 77 \text{ дм}^3$ обрано мембранний розширювальний бак DAN-WATES об'ємом 80 дм^3 .

3.3.4. Теплова ізоляція, захист від корозії

В якості теплоізолюючого матеріалу приймаємо трубки ODE R-FLEX PRM PIPE фірми R-FLEX товщиною $\delta = 32 \text{ мм}$.

						ДЗ/10-2019/921.ТМ	Арх.
Зм.	Корект.	Зам.	Відом.	Підпис.	Дата		б

3. Електротехнічні рішення

3.1. Загальні дані

Електропостачання ГТП передбачається на напрузі 220В з системою заземлення TN-C-S від існуючого вводу. Основні показники ГТП приведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Встановлена потужність	6,35 кВт
Розрахункова максимальна потужність	4,60 кВт
Розрахунковий максимальний струм	23,60 А

По надійності електропостачання обладнання ГТП відноситься до споживачів II-ї категорії (ПБЕ та ДПАОП 0.00-1.32-01). Компенсація реактивної потужності не передбачається.

Силовими струмоприймачами тепловпункту є електродвигуни насосів, електроінструмент та т.п.

3.2. Електроосвітлення ГТП

Електроосвітлення ГТП запроектовано робоче та резервне. Робоче і резервне освітлення прийнято на напрузі 220В. Живлення аварійного освітлення передбачено від джерела струму з напругою 12В. У якості джерела світла прийняті світильники з люмінесцентними лампами виконання IP65 «Сігма» ЛПП 01-2х36-002. У якості аварійного освітлення, на вході в ГТП, встановлено світильник з акумуляторною батареєю PREST-381PC. Робоче та резервне освітлення живиться від щита ШС. Групові мережі виконуються кабелем марки ВВГнгд. Світильники закріплюються на стелі дюбелями, згідно з інструкцією по монтажу світильників. Кабель прокладається від розподільчого щита ШС в коробі, по стінах та стелі – в гофрорукаві.

						ДЗ/10-2019/921.ЕТР			
Зм.	Колос	Зак.	ВРозк.	Підпис	Дата	«Проектування та впровадження блочного індивідуального тепловпункту (ГТП)» Електротехнічні рішення	Стаття	Архив	Архив
ГОТ		Барановський			12.19		РП	1	2
Розробив		Нароз			12.19		ГОВ «Завод енергетичного обладнання «ДАН»		
Перевірив		Зітін			12.19				
Нормир.		Бажко			12.19				

В ІТП передбачено контур заземлення, який виконано зі штабової сталі розміром 25х4 мм, що прокладається на відмітці +0,3 м від рівня підлоги. Даний контур приєднати до окремого контуру виконаного за схемою "трикутник" з заглибленням в землю на 2 метри згідно нормативної документації.

Для зрівнювання потенціалів всі металеві частини технологічного обладнання приєднано до лінії заземлення.

						ДЗ/10-2019/921.ЕТП	Арх.
Ин.	Класс	Урок	Место	Подпись	Дата		



Корпорація "Теплоенерго"
Структурний підрозділ
ТОВ «Завод енергетичного обладнання «ДАН»

08113, Київська область, Києво – Святославський район, с. Петрушки, вул. Миру, 25-а
тел.: (050) 382-75-51; (044)290-44-22 e-mail: sale@teploenergo.com.ua www.teploenergo.com.ua

Технічна документація на модульний блок системи теплопостачання

Шифр: ТО-05/в-100

Інв. №: 14387и6.11.11.19

Об'єкт: ІТП в контейнері

Київ - 2019

1. Загальні дані

Найменування виробу	Модульний блок системи опалення
Схема приєднання до мережі	Незалежна
Підприємство-виробник	ТОВ "Завод енергетичного обладнання "ДАН"
Призначення	опалення

2. Технічні характеристики та параметри

Теплова потужність МТА, кВт	500	
Теплова потужність ІТП, кВт	100	
Максимальна електрична потужність	2,44 кВт, 1– 230 В, 50 Hz	
	паровий контур	водяний контур
Температурний графік, °C	90/50	50/30
Витрата теплоносія, м³/год	2,21	4,35
Робочий тиск теплоносія, МПа:	1,60	1,00
Гідравлічний опір модульного блока, кПа:	22,00	34,00
Габаритні розміри, мм:		
Довжина (L)	1960	
Ширина (B)	1210	
Висота (H)	2060	
Загальна маса блока, кг	550	

3. Склад модульного блока

Найменування	Позначення	Параметри	
		Тиск	T, °C
Теплообмінник	ТОВ "ЗЕО "ДАН"	PN16	150 °C
Насоси	"WILLO"	PN10	120 °C
Запірна арматура	"Vitech", "IVR"	PN16	150 °C
Запоротні клапани	"IVR", "Vitech"	PN16	150 °C
Сітчасті фільтри	"IVR", "Vitech"	PN16	230 °C
Контрольно-вимірювальні прилади	"Danfoss", ПАО "Склоприлад"	PN16	150 °C
Труба об'єкта	ГОСТ 10704-91		
Рама	ГОСТ 8639-82		

4. Діаметри приєднання

Позначення	Призначення трубопроводу	Діаметр	Тип приєднання
T1.1	Вхід води від контуру №1	DN50	фланцеве
T2.1	Вихід води до контуру №1	DN50	фланцеве
T1.2	Вхід води від контуру №2	DN32	муфтове
T2.2	Вихід води до контуру №2	DN32	муфтове
T11	Вхід теплоносія в систему опалення	DN50	фланцеве
T21	Вихід теплоносія з системи опалення	DN50	фланцеве

5. Гарантія виробника

Гарантійний термін експлуатації встановлюється 24 місяці з дня введення в експлуатацію.

Термін служби виробу при правильній експлуатації 20 років.

Позиція	Найменування і технічні характеристики обладнання та матеріалів	Тип, марка, позначення обладнання	Одн. виміру		Кіл-ть
			конт.	конт.	
1	Теплообмінник пластинчастий	ДАН	ФН-25 (23 пл.)	шт	1
2	Насос циркуляційний DN 40 P=0.95 кВт, U=230 В, I=4.57 А	ВВ	TOP-S 40/15 EM PN2/10	шт	2184528
3	Насос циркуляційний DN 25 P=0.39 кВт, U=230 В, I=1.61 А	ВВ	TOP-S 25/10 EM PN2/10	шт	2083962
4*	Насос циркуляційний DN 25 P=1.1 кВт, U=230 В, I=7.2 А	ВВ	MH 208-1E/1-330-80-2	шт	4034256
5	Очищений фільтр фланцевий DN 50	ПЗ	0632	шт	2
6	Очищений фільтр фланцевий DN 50	ПЗ	0632	шт	1
7	Очищений фільтр муфтовий DN 32	ВВ	тип 504	шт	1
8	Будівельний кран фланцевий DN 50	Interve	630.9/7/1	шт	2
9	Будівельний кран фланцевий DN 50	Interve	630.9/7/1	шт	4
10	Будівельний кран муфтовий DN 32	Valtec	VT 214N/VT 215	шт	4
11	Будівельний кран муфтовий DN 25	Valtec	VT 214N/VT 215	шт	4
12	Будівельний кран муфтовий DN 25 зі зсувом всередину	Valtec	VT 214N/VT 215	шт	1
13	Будівельний кран муфтовий DN 20	Valtec	VT 214N/VT 215	шт	1
14	Будівельний кран муфтовий DN 15	Valtec	VT 214N/VT 215	шт	5
15	Балансуючий клапан ручний DN50	Нас	890max 4117M	компл.	1
16	Балансуючий клапан ручний DN32	Нас	890max 4117M	компл.	1
17	Запорний клапан мембранний позначений DN50	ВВ	тип 658	шт	3
18	Запорний клапан муфтовий DN32	ВВ	тип 890H	шт	1
19	Запорний клапан DN25	VALTEC	VT.1831	шт	2
20	Система асиста фланцева DN50	VITEC	AB-E	шт	4
21	Система асиста фланцева DN32	VITEC	AB-E	шт	2
22	Термометр біметалевий границя виміру 0÷120°С, погрешка 10°	Сенсоріал	ТБ-100	шт	101334
23*	Гидравлічний насосний станок висхідного D=1.6 MPa			шт	14
24*	Мембранний теплообмінник муфтовий DN40		SKYLAR INT 8	компл.	1
25	Мембранний розширювальний бак V=65 L		DAN-RATES 80	шт	1
6/1	Автоматичний повітрярозпуск з крильним краном DN 15	VITRE		шт	1
6/2	Вентиль Sanibox з відкидом з фіксатором розширювального танку DN50			шт	2
6/3	Відбірний пристрій тиску 364-275.00-90			компл.	14
6/4	Трубка обвідна			компл.	1
6/5	Рампа під блок			шт	1

Примітка: Обладнання постачається Замовником

№ протоколу: 14367.06.17.1.19						ТО-05/в-100			
						ГТТ в контейнері			
	Зм.	Арх.	Модифікація	Підп.	Дата				
	Виробник					Модульний блок системи теплопостачання	Статус	Архив	Архив
	Розробник	Мороз						1	1
	Легендар	Боско							
						Специфікація обладнання	ТОВ "Завод енергетичного обладнання ДАН"		



ТОВ «Завод енергетичного обладнання «ДАН»

08113, Київська область, Києво – Святошинський район, с. Петрушівка, вул. Миру, 25-в
тел. (044) 290-44-22 моб. тел. (050) 382-75-51 e-mail: sale@teploenergo.com.ua www.teploenergo.com.ua

Специфікація на теплообмінник

Замовник:

Об'єкт: ТТП в контейнері

Виконавець: Мороз М.В.

Розбірний пластинчастий теплообмінник "ДАН"

Дата 12.09.2019

Версія: 4.16.6.7

Призначення:

Технологія

Позн:

Апарат: "ДАН" ФП-05 -2-23-01-0.87-02

Технічні дані

Гріюча сторона

Холодна сторона

Теплоносії:

Water

Water

Масова витрата	[t/h]	2.16	---	[t/h]	4.31
Об'ємна витрата	[m ³ /h]	2.208	---	[m ³ /h]	4.352
Температура на вході	[°C]	90.00	---	[°C]	30.00
Температура на виході	[°C]	50.00	---	[°C]	50.00
Теплофізичні властивості		Вода	Вода	Вода	Вода
Дім. з'ємність	[cP]	0.313	0.549	0.796	0.549
Густина	[kg/m ³]	984.8	986.1	994.0	986.1
Теплоємність	[kJ/kgK]	4.184	4.174	4.183	4.174
Теплопровідність	[W/mK]	0.636	0.640	0.630	0.640
Пит. теплота конденсації	---	---	---	---	---
Тиск пари	---	---	---	---	---

Характеристики апарата

Теплова потужність	[kW]		100.00		
Площа поверхні теплообміну	[m ²]		0.87		
Середньозв. різниця температур	[K]		28.85 / 28.85		
Коеф. теплопередачі номінал./факт.	[W/m ² K]		3967 / 5030		
Коеф. забруднення	[m ² K/W]		0.0000532		
Запас поверхні теплообміну	[%]		26.78		
Втрата тиску	[kPa]	5.787		[kPa]	19.846
Кількість ходів		1			1
Загальна кількість каналів			22		
Тип каналів			11*HH		

Конструкція апарата

Загальна кількість пластин			23		
Об'єм	[dm ³]	0.968			0.968
Розрахунковий тиск	[barg]		10.0		
Макс. роб. температура	[°C]		140.0		
Матеріал	пластина	1.4404 (0.50 mm)			
	укріплення	NBR HT			
	рама	вуглецева сталь			
Приєднання	гріюча сторона	F1 => F4 Під муфту DN 25			
	холодна сторона	F3 => F2 Під муфту DN 25			

Примітка

Лист № подл.

14367.12.09.19

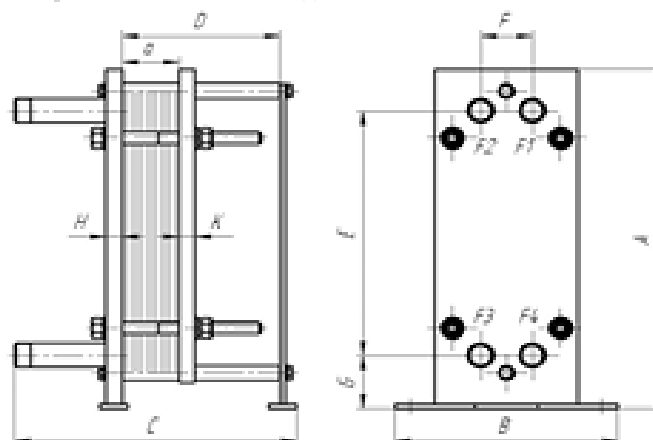


ТОВ «Завод енергетичного обладнання «ДАН»

Заказчик:

Об'єкт: ГТТ в контейнері

Габаритні розміри та схема приєднання теплообмінника "ДАН" ФП-05 -2-23-01-0.87-02



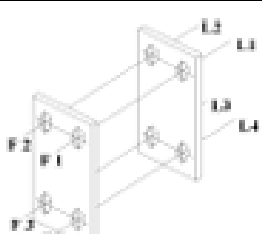
1	A	Загальна висота	480	мм.
2	B	Загальна ширина	305	мм.
3	C	Загальна довжина	362	мм.
4	D	Загальна довжина корпусу	300	мм.
5	E	Відстань між центрами міжтрубних	381	мм.
6	F	Горизонтальна відстань між трубами	70	мм.
7	G	Відстань від рівня підлоги до нижнього патрубка	75,3	мм.
8	H	Товщина зовнішньої пластини	20	мм.
9	K	Товщина рухомої пластини	20	мм.
10	a	Загальна довжина паяної пластини	62,8	мм.

Одноступенчатый теплообменник

Поз.	Тип приєднання, DN	Теплоносій		
F1	Під муфту DN 25	Вхід трієчного теплоносія (T1)	50.00	°C
F2	Під муфту DN 25	Вихід теплоносія, що нагрівається (T1)	50.00	°C
F3	Під муфту DN 25	Вхід теплоносія, що нагрівається (T2)	30.00	°C
F4	Під муфту DN 25	Вихід трієчного теплоносія (T2)	50.00	°C
L1				°C
L2				°C
L3				°C
L4				°C

Лист № 10.44.

14.06.12.09.19



Примітка:

Вага теплообмінника: 42 кг.



Отдел продаж
E-Mail
Телефон

Клиент

Отдел продаж
E-Mail
Телефон

Технические данные

Насос с мокрым ротором Standard TOP-S 25/10 EM PN6/10

Внес проект

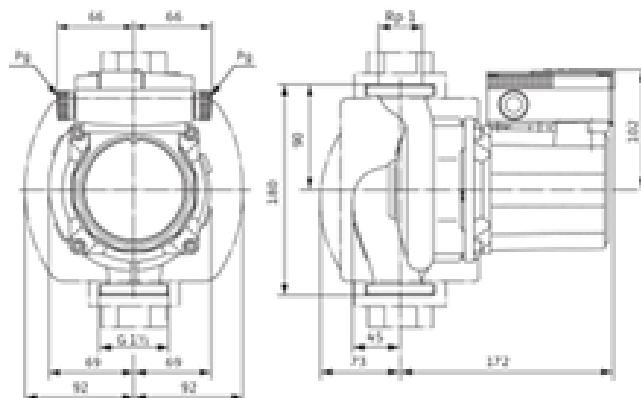
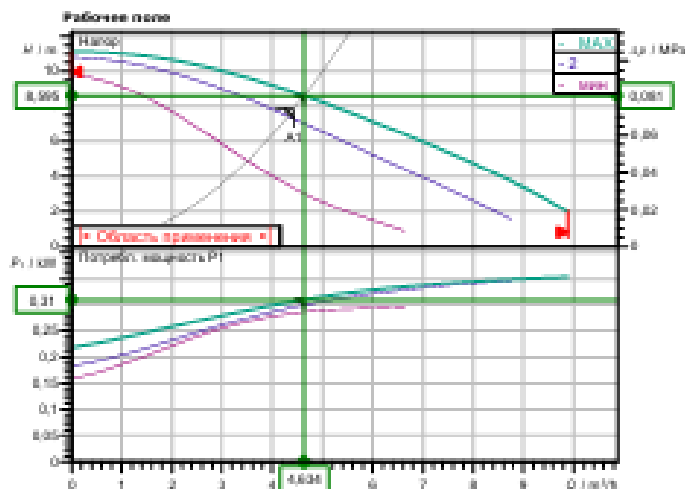
Принят без изменений 2019-11-08 15:23:24/25

Конструктор

Место установки

Конкретное наименование

Дата 08.11.19



Задать рабочие параметры

Производительность: 4,63 м³/ч
Напор: 8,59 м
Перекачиваемая жидкость: вода 588 %
Температура перекачиваемой жидкости: 40 °C
Плотность: 999,20 кг/м³
Кинематическая вязкость: 0,32 мм²/с

Гидравлические данные (Рабочая точка)

Производительность: 4,63 м³/ч
Напор: 8,59 м
Потребляемая мощность P₂: 0,31 кВт

Данные продукта

Насос с мокрым ротором Standard
TOP-S 25/10 EM PN6/10
Мак. рабочее давление: 1 МПа
Температура перекачиваемой жидкости: -10 ... +138 °C
Макс. Температура окр. Среды: 40 °C
Минимальный подпор при 50 / 60 / 115 °C: / /

Данные мотора

Подключение к сети: 1— 230 В / 50 Hz
Допустимый перепад напряжения: ±10 %
Макс. частотой вращения:
Ном. Мощность P₂: 0,18 кВт
Потребляемая мощность P₂: 0,30 кВт
Потребление тока: 1,91 А
Вид защиты: IPX4D
Insulation class: II
Защита электродвигателя:
Emitted interference: EN 61000-6-3
Interference resistance: EN 61000-6-2
Рекоменд. вид для кабеля:

Присоединительные размеры

Патрубок на стороне всасывания: G 1/4, PN10
Патрубок на напорной стороне: G 1/4, PN10
Габаритная длина:

Материалы

Картер насоса: S 1306, EN-GJL-200
Рабочее колесо: PP-LGF50
Вал: 1.4034, X46Cr13
Материал подшипников: Нитроуглерод

Данные для заказа

Вес, прик.: 6,2 кг
Номер позиции: 2061962



Стандартный
B-Mat
Technipon

Клемат

Стандартный
B-Mat
Technipon

Технические данные

Насос с мокрым ротором Standard
TOP-S 40/15 EM PN6/10 2-SPEED

Вид проекта

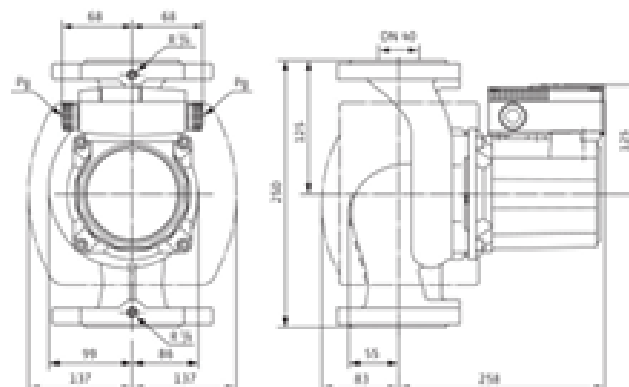
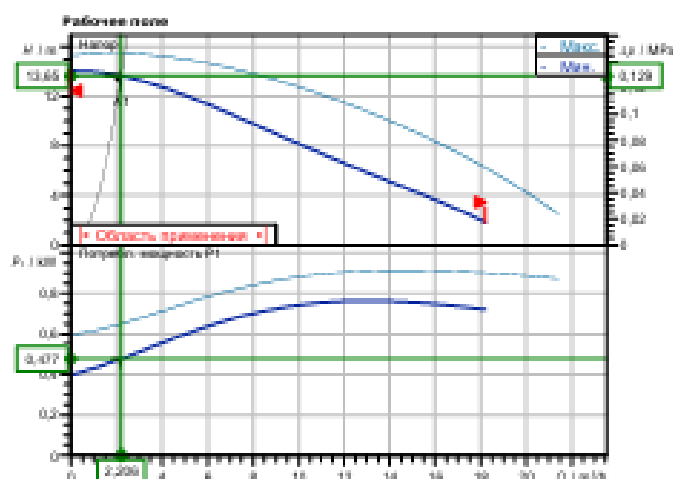
Проект №: 2019-11-08 18.33.24.026

Вид проекта

Насос с мокрым ротором

Вид проекта

Дата: 06.11.19



Задать рабочие параметры

Производительность 2,21 m³/h
Напор 13,70 m
Перекачиваемая жидкость вода 100 %
Температура перекачиваемой жидкости 20 °C
Плотность 999,20 kg/m³
Кавитационная высота 0,32 m/m³

Гидравлические данные (Рабочая точка)

Производительность 2,21 m³/h
Напор 13,65 m
Потребл. мощность P₂ 0,49 kW

Данные продукта

Насос с мокрым ротором Standard
TOP-S 40/15 EM PN6/10 2-SPEED
Мак. рабочее давление 1 MPa
Температура перекачиваемой жидкости 100 °C
Макс. Температура окр. Среды 40 °C
Минимальный подпор при 50 / 60 / 120 °C / /

Данные мотора

Подключение к сети 1~230 V / 50 Hz
Допустимый перепад напряжения макс. частотой вращения 410 %
Ном. Мощность P₂ 0,57 kW
Потребл. мощность P₂ 0,55 kW
Потребление тока 4,57 A
Вид защиты IPX4D
Insulation class II
Защита электромагнитов Emitted interference EN 61000-6-3
Interference resistance EN 61000-6-2
Разъемный ввод для кабеля

Присоединительные размеры

Па трубок на стороне всасывания DN 40, PN6/10
Па трубок с напорной стороны DN 40, PN6/10
Габаритная длина

Материалы

Корпус насоса S 1301, BR-GIL-250
Рабочее колесо PP-LGF50
Вал 1.4004, X46Cr13
Материал подшипников Carbon graphite, all Carbon

Данные для заказа

Вес, прик. 20,9 kg
Номер позиции 2165526



Стандартный
B-Pad
Телефон

Кнопка

Стандартный
B-Pad
Телефон

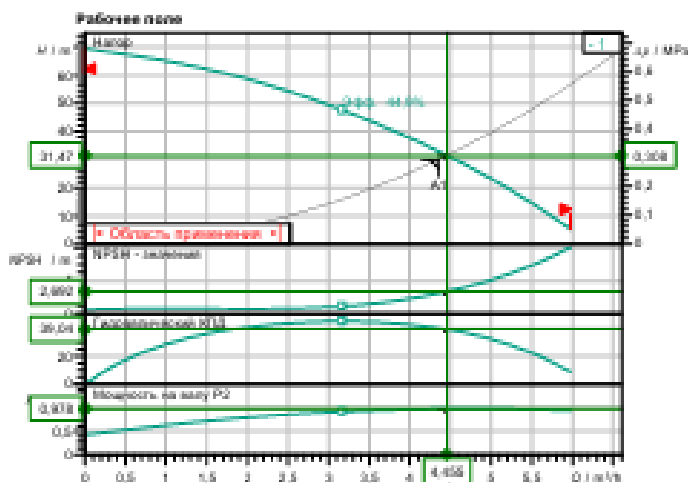
Технические данные

Высоконапорный центробежный насос
MHI 206-1/E/1-230-50-2

Вид продукта

Насос продукта
Метод управления
Насос с автоматическим управлением

Дата 14.11.18



Pump curves in accordance with ISO 9906, Appendix A.

Задать рабочие параметры

Производительность 4,35 m³/h
Напор 30,00 m
Перевозимая жидкость вода 100 °C
Температура перекачиваемой жидкости 100 °C
Плотность 999,30 kg/m³
Вязкость 1,00 mPa·s

Гидравлические данные (Рабочая точка)

Производительность 4,46 m³/h
Напор 31,47 m
Мощность на валу P2 0,68 kW
Гидравлический КПД 39,04 %
NPSH 3,97 m

Данные продукта

Высоконапорный центробежный насос
MHI 206-1/E/1-230-50-2
Мак. рабочее давление 1 MPa
Входное давление макс. 5 bar
Температура перекачиваемой жидкости ... +100 °C
Макс. температура окр. среды 40 °C

Данные мотора

Класс эффективности мотора
Подключение к сети 1—230 V / 50 Hz
Допустимый перепад напряжения ±10 %
Мак. частотой вращения 2900 1/min
Мех. Мощность P2 1,10 kW
Номинальный ток 7,20 A
Коэффициент мощности 0,96
КПД 50% / 75% / 100% 56,9/64,3/67,2%
Вид защиты B4
Insulation class F
Защита электродвигателя PTO

Присоединительные размеры

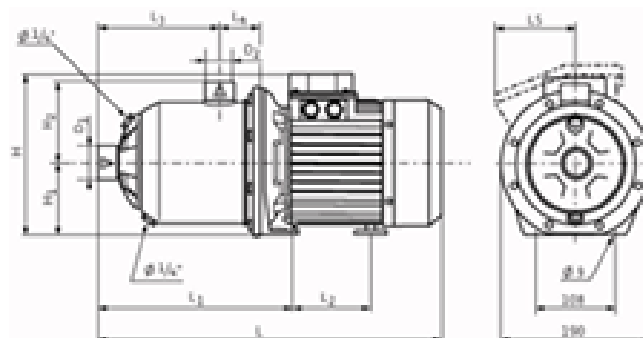
Папругаб на стороне всасывания Rp 1, PN 10
Папругаб с напорной стороны Rp 1, PN 10

Материалы

Карпус насоса 1.4301 (AISI304)
Рабочее колесо 1.4301 (AISI304)
Сталь-носик уплотнения EPDM
Вал насоса 1.4301 (AISI304)
Механикал сеп 8Q1E3GG

Данные для заказа

Вес, прием 15,7 kg
Номер позиции 4024290



Размеры	mm
H	324
H1	90
H2	104
L	472
L1	376
L2	103,5
L3	181,5
L4	52
L5	106
Ø D1	1
Ø D2	1

Программ версионизация, Версия 4.3.12 - 2018/07/10 (Build 382)
Версия данных 01-07-2018

Всего 11 элементов

Страница 1 / 3

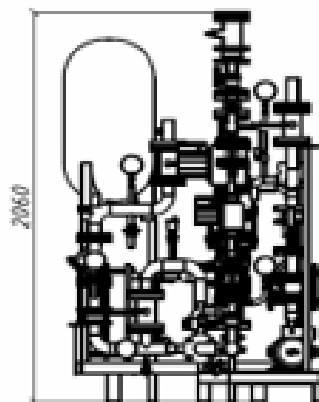
6. Додаткова інформація

1. Теплова ізоляція трубопроводів трубної об'язки та теплообмінника в комплект поставки модульного блоку не входить. Передбачити теплоізоляційні роботи відповідно до СНП 2.04.14-88 "Теплова ізоляція обладнання та трубопроводів"

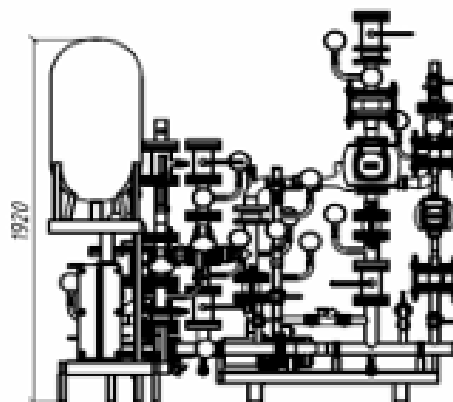
2. Для заносу модульного блоку в приміщення допускається частково розібрати блок на фланцевих з'єднаннях із послідовною заміною ущільнювальних прокладок. При цьому гарантія на виріб зберігається.

Види модульного блоку

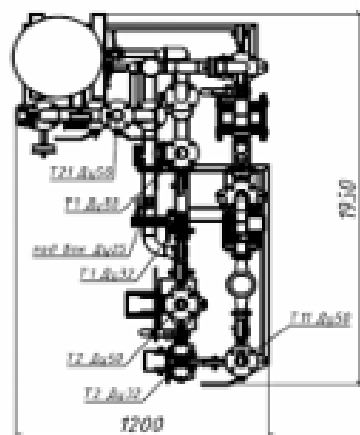
Перед (загальний вид)



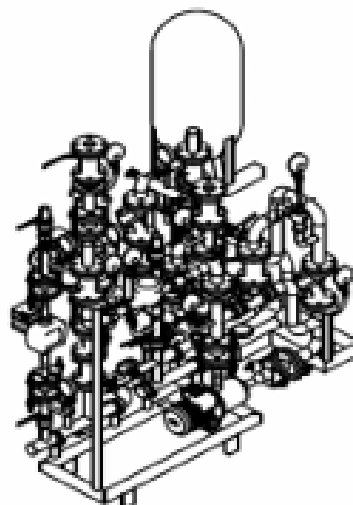
Правий бік (загальний вид)

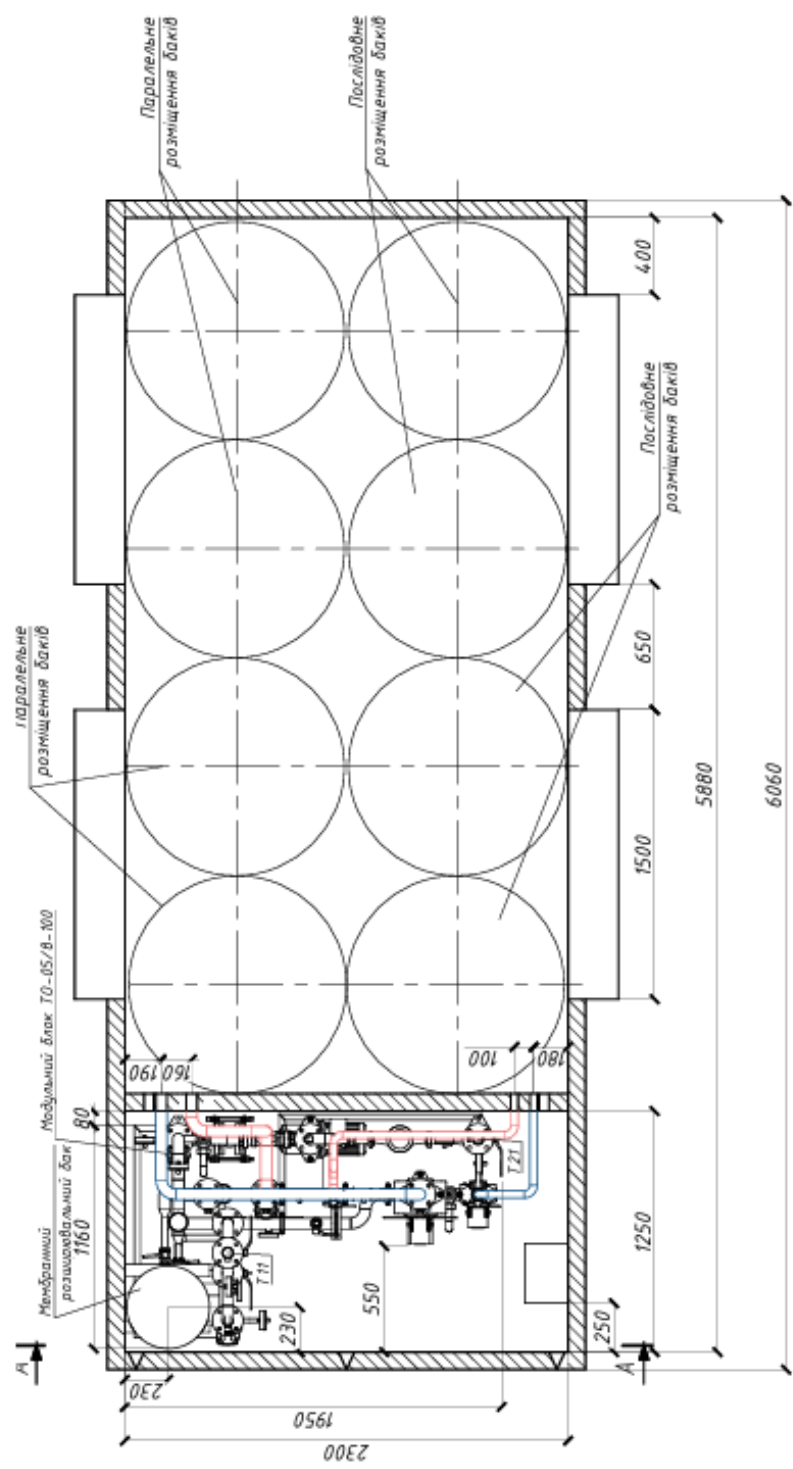


Зверху (загальний вид)



Ізометрія (загальний вид)





№	№ докум.	Зам. від №
№	№ докум.	Зам. від №

ДЗ/10-2019/921.ТМ									
«Проектування та виготовлення блочного мобільного кондиціонера (MTA)»									
технічний (ТТ) для мобільного кондиціонера (MTA)»									
Індивідуальний технічний пункт				Статус		Архив		Архив	
Технологічний пункт				РП		5		5	
План розміщення обладнання				ТОВ "Завод енергетичного обладнання "ДА"					
Н. кентер				Бажко					
Датум				12.19					
Підпис									
№ докум.				12.19					
Варіант									
Розробка				Мірош					
Виробництво				Зені					
У. кентер				Бажко					
Н. кентер				Бажко					

ДОДАТОК Є

Водогрійний опалювальний котел «Віктор-100», встановлено на експериментальному стенді №2 Лабораторії процесів та технологій теплозабезпечення ІТТФ НАН України. Котел забезпечує теплопостачання в будівлі інституту площею до 1200 м². Котел - водогрійний, низькотемпературний, двоходовий, газощільний, обладнаний вентиляторним рідкопаливним пальником.

Аналіз димових газів проводився за допомогою газоаналізатора Eurotron (Ecolaine-4000) та rbr - Ecom KD.

Пальник, що застосовується в ході досліджень - Golling/Німеччина потужністю від 57 до 142 кВт із витратою рідкого палива від 4,8 до 12 кг/год.

rbr-Ecom - KD	
Datum	Zeit
25.11.20	10:04:20
BImSchU	
Brennstoffart	
Heizöl	
T.Luft	12 °C
T.Gas	161 °C
T.Kessel	100 °C
O2	2.7 %
CO 0.0%	68 mg/m³
NO 0.0%	92 mg/m³
CO2	13.4 %
Eta	93.4 %
Verluste	6.6 %
Lambda	1.15
Taupunkt	45 °C

rbr-Ecom - KD	
Datum	Zeit
25.11.20	09:25:38
BImSchU	
Brennstoffart	
Heizöl	
T.Luft	12 °C
T.Gas	163 °C
T.Kessel	100 °C
O2	2.2 %
CO 0.0%	183 mg/m³
NO 0.0%	83 mg/m³
CO2	13.8 %
Eta	93.4 %
Verluste	6.6 %
Lambda	1.12
Taupunkt	45 °C

rbr-Ecom - KD	
Datum	Zeit
26.11.20	10:28:48
BImSchU	
Brennstoffart	
Heizöl	
T.Luft	16 °C
T.Gas	160 °C
T.Kessel	100 °C
O2	4.2 %
CO 0.0%	57 mg/m³
NO 0.0%	83 mg/m³
CO2	12.3 %
Eta	93.2 %
Verluste	6.8 %
Lambda	1.25
Taupunkt	44 °C

ДОДАТОК Ж

Затверджую
Заступник директора з наукової роботи
ІТТФ НАН України
чл.-кор. НАНУ Авраменко А.О.
«___» грудня 2020 р.

ПРОТОКОЛ № 1/ДЗ-80/2019

випробувань мобільного теплового акумулятора контейнерного типу
м. Київ листопад - грудень 2020 р.

1. Об'єкт досліджень:

мобільний тепловий акумулятор контейнерного типу МТА-0,5МВт.

1.1 Скорочення та умовні позначки

МТА – мобільний тепловий акумулятор;

ІТП – індивідуальний тепловий пункт;

T1, T2 – температура на подаючому та зворотному трубопроводі;

ККД – коефіцієнт корисної дії.

1.2 Місце проведення випробувань та система «нагріву/охолодження» мобільного теплового акумулятора МТА - 0,5МВт.

Випробування проведено в період 24.11.2020 - 11.12.2020 р. на території Інституту технічної теплофізики НАН України, м. Київ, вул. М. Капніст, 2а.

Принципова схема підключення МТА-0,5МВт до системи нагріву/охолодження надана на рисунку 1.

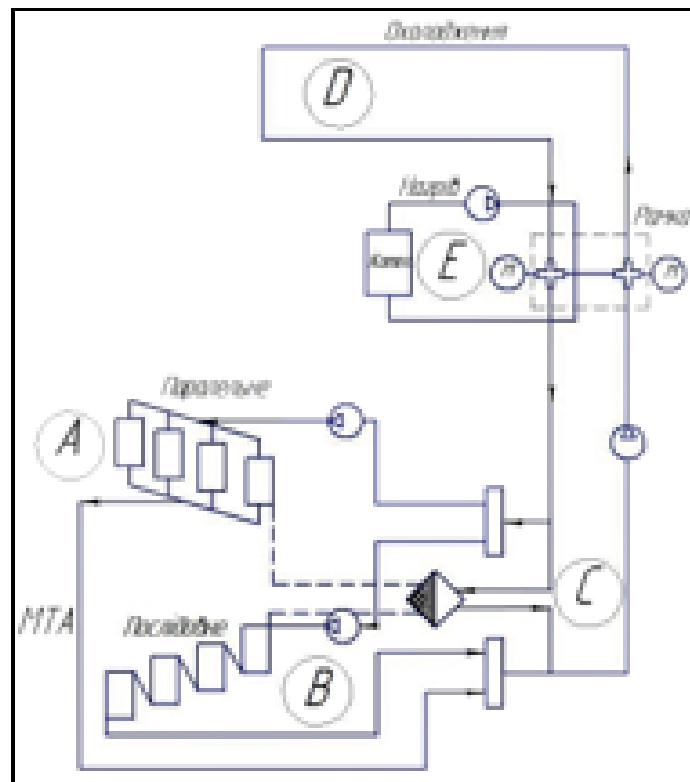
Система підключення МТА-0,5МВт складається з:

А – контур циркуляції 2,0 м³/год, паралельного підключення 4 базис-акумуляторів ємністю 1500 літрів кожен, в складі МТА;

В – контур циркуляції 2,2 м³/год, послідовного підключення 4 баків-акумуляторів ємністю 1500 літрів кожен, в складі МТА;

С – контур мережевого насоса циркуляції теплоносія МТА, продуктивністю 4,5 м³/год з підключенням трубопроводів гнучкими шлангами з системою «CAM-Lock»;

Д – контур охолодження опаловальною площею 768 м² (контур нагріву примусової припливної вентиляції будівлі №2 ІТТФ НАНУ), сумарною ємністю 125,6 літрів теплоносія;



А – контур паралельного підключення баків-акумуляторів МТА, **В** – контур послідовного підключення баків-акумуляторів, **С** – контур циркуляції теплоносія МТА, **Д** – контур охолодження, **Е** – контур нагріву.

Рисунок 1 - Система нагріву/охолодження мобільного теплового акумулятора контейнерного типу МТА-0,5MWt

Е – контур нагріву ємністю 300 літрів теплоносія (джерело теплоти в складі водогрійного лабораторного котла, теплової потужністю 100 кВт, та циркуляційного насоса продуктивністю 2,2 м³/год);

рамки керування – яка складається з двох хрестовин з шаровими кранами розташованих ексцентрично відносно центральної засувки труби зворотного руху теплоносія джерела теплоти та має підключення до контуру D та контуру С.

При зарядці МТА циркуляція теплоносія здійснюється між контуром Е та С, з змінним або одночасним включенням контурів А та В. Контур D при цьому відключено, рисунок 1. Подаюча лінія теплоносія під'єднується до зворотного трубопроводу контуру С. Нагріта котлом вода поступає в контури А та В безпосередньо через байпас пластинчатого теплообмінника, або теплота передається шляхом теплообміну за допомогою теплообмінника ІТП. Циркуляція теплоносія здійснюється за допомогою насосів контурів Е, А и В. Теплоносій повертається в контур Е через байпас насосу контуру С, насос С при цьому відключено. У разі необхідності насос С включається в роботу, після перекриття байпасу С. Швидкість руху теплоносія контурів А та В змінюється в процесі проведення досліджень, отримані дані фіксуються в журналі проведення робіт. Швидкість насосів Е та С постійна і відповідає паспортним даним насосів за напором та продуктивністю і в ході роботи не змінюється.

Після завершення циклу зарядки МТА гнучкі шланги з швидко-роз'ємними з'єднаннями типу «CAM-Lock» від'єднуються від МТА та їх положення відносно подачі теплоносія змінюється. Шланг подачі приєднується до зворотної лінії С, а шланг зворотної води до подаючої лінії С.

Після цього контур Е зупиняється, на рамці керування відкривається рух теплоносія між контуром С та D. Циркуляція проводиться за допомогою насосу С, тиск та напір регулюється положенням відкриття/закриття двохходового балансувального крану на байпасі насоса С. Робочий тиск теплоносія в контурах

А та В регулюється двоходовим балансувальним краном на байпасі встановленим між ними. Теплообмін між контурами С та D здійснюється через пластинчатий теплообмінник ITT.

Після завершення циклу розрядки МТА та фіксації даних температури, зміни тиску та теплопродуктивності, процес повторюється в зворотному порядку.

2 Прилади та обладнання

2.1 Використані засоби вимірювання (Додаток А):

- Теплообчислювач SCYLAR (в складі лічильника теплової енергії лічильника тепла MTX 1A10.DF.2LO-YD4).

- Багатофункціональний GSM-контролер «PRO-X» застосовується для дистанційного контролю та керування, контролю доступу, контролю температури та інше

- Прилад для реєстрації температур TRITON 6004TC з комутаційним модулем TRITON C37 та датчиками температури АТФ.А.687265.016.

- Лічильник електроенергії MTX 1A10.DF.2LO-PD4 «Matrix AMM».

- Цифровий реєстратор-індикатор температури EZODO ATS-2000.

- Тепловізор Ti-160.

- Пірометр CEM DT-8867H.

2.2 Модуль TRITON 6004TC - це мікропроцесорний пристрій для реєстрації та перетворення сигналів, отриманих за допомогою термопар або інших датчиків - джерел напруги.

3 Температура зовнішнього повітря під час досліджень

Температура зовнішнього повітря в період проведення натурних випробувань МТА-0,5МВт в Києві по даним <https://www.gismeteo.ua/> наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 - Зовнішня температура повітря в м. Києві

МІСЯЦЬ	Листопад 2020 Р.						Грудень 2020 Р.										
ДАТА	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
T, °C, ВДЕНЬ	3	2	2	2	2	2	0	0	1	2	0	-4	-4	-4	-4	-1	2
T, °C, ВНОЧІ	0	0	0	1	1	0	-3	-2	-4	-1	-4	-6	-9	-9	-6	-5	-2

4 Методика вимірювань

4.1 На першому етапі опрацьовуються режими експлуатації основного і допоміжного обладнання за якісними/кількісними показниками, виявляються оптимальні умови роботи обладнання МТА. Після цього результати випробувань обробляються і аналізуються.

4.2 Вимірювання температур виконується за допомогою приладу для реєстрації температур TRITON 6004TC з комутаційним модулем TRITON C37. Схема розміщення датчиків температури АТФ.А.687265.016 та їх комутація з концентратором вимірювань представлено в таблиці 2. Лічильником теплової енергії MTX 1A10.DF.2LO-YD4 фіксується кількість поданої на зарядку МТА теплоти та об'єм витрати теплоносія.

Спожита електрична енергія фіксується штатним лічильником електроенергії.

Кожні 2 години ведеться візуальний контроль тиску, температур і розходу теплоносія та електроенергії з реєстрацією в журналі.

4.3. Температура в приміщеннях будівлі перевіряється за допомогою цифрового індикатора температури EZODO ATS-2000 та пірометру.

Таблиця 2 - Комутація датчиків температури з концентратором вимірювань

КОНТУР	ПАДАЮЧА ЛІНІЯ	ЗВОРОТНА ЛІНІЯ	ТЕМПЕРАТУРА В БАКУ- АКУМУЛЯТОРІ	ЗАНУРЮВАНІ ДАТЧИКИ МІЖ БАКАМИ-АКУМУЛЯТОРАМИ
А	№24	№23	№ 27,28,29,30	№ 25,26
В	№17	№18	№ 11,12,13,14	№ 7,8,9,10
С	№ 3	№ 5		

4.4 Дослідження проходить в умовах періодичного підвищення температури теплоносія при зарядці МТА. Вимірювання проводились для діапазону температури від 30 °С до 90 °С, тривалість інтервалу – 25 хв.

4.5 При розрядці МТА проводяться аналогічні вимірювання в зворотному порядку.

4.6 Для перевірки якості теплоізоляції та отримання даних для розрахунків теплових втрат через огорожувальну конструкцію МТА застосовується тепловізор Ti-160 та пірометр.

4.7 Дистанційний цілодобовий контроль значення температур в подавочому та зворотному трубопроводах контуру С здійснюється багатофункціональним GSM-контролером «PRO-X».

5 Результати досліджень

5.1 Для отримання даних проведено цикл з трьох досліджень для кожного технологічного режиму за однакових умов проведення випробувань. Отримані дані для кожного матеріалу представлені, як середні значення в температурному діапазоні від 30 °С до 90 °С.

5.2 Фотографія роботи та вимірювань МТА наведені на рисунках 2 - 5.

5.3 На рисунку 2 приведені результати зміни температур подачі T1 та зворотної води T2 контуру С в період з 24.11.2020 по 30.11.2020. Нагрів МТА відбувався від контуру Е в період часу 9.10 25.11.2020 до 16.25 25.11.2020. за цей час було використано 314,4 кВт теплоти.

Початкова температура в контурі циркуляції С складала близько 40°С. До 7.30 26.11.2020 МТА охолоджувався і за цей час на контур споживача (контур D) було передано 78,3 кВт теплоти.

Подальший нагрів МТА почався 26.11.2020 у 7.35. та закінчився о 18.40 26.11.2020. Температура в баках-акумуляторах досягла значення 75-80 °С. За цей

Охолодження МТА тривало до 10.56 30.11.2020. ТАМ в МТА було нагріто до температури 80 °С. В контурі циркуляції С температура теплоносія знизилась з температури 80 °С до температури 28 °С. Температура зовнішнього повітря складала 0 °С, таблиця 1. Температура в приміщеннях споживача зберігалась на рівні 18 °С. За 63 години було передано споживачу 2,07 МВт теплоти приблизно 330 кВт на годину ($\dot{Q}_{\text{act}} = 0,256$).

Більш детальну інформацію, стосовно умов проведення випробувань та дані окремих досліджень наведено у зведеному електронному Ексел-файлі, який додано до цього протоколу.

5.4. Результати випробувань проведених на рисунках 3 і 4 у період з 12.00 3.12.2020 по 12.00 4.12.2020. Початкова температура води в контурі циркуляції складала 25 °С. Після включення в роботу водогрійного котла контуру Е спостерігається активний нагрів баків-акумуляторів контуру А. При цьому, контури В і D було відключено. Нагрів баків проводився через пластинчатий теплообмінник ІТП, а не через байпас, як описано в п.5.2.

Нагрів баків контуру А тривав 3 години 30 хвилин до 15.30 3.12.2020. За цей час на нагрів 4 баків-акумуляторів було витрачено 366 кВт теплоти.

Після чого було включено в роботу контур D, а контур Е зупинений. Процес охолодження МТА тривав до 12.00 4.12.2020, що склало 20 годин. За цей час в баках-акумуляторах контуру А знизилась з 64 °С до 36 °С. Споживачу за цей час було відпущено 1046,7 кВт теплоти ($\dot{Q}_{\text{act}} = 0,32$), дивись рисунок 5.

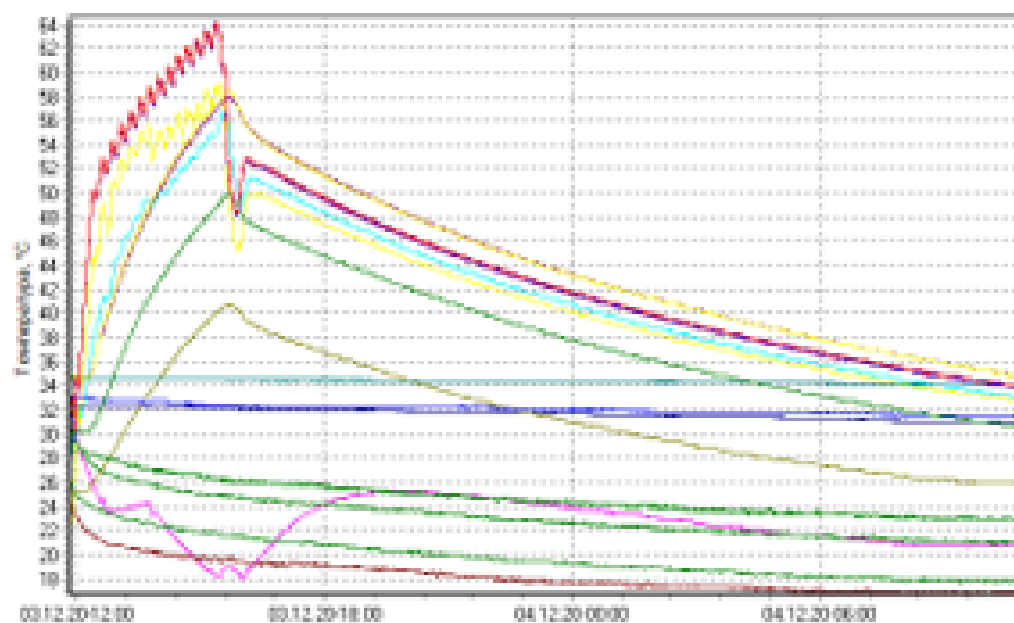


Рисунок 3 – Зміна показників температури мобільного теплового акумулятора контейнерного типу МТА-0,5МВт

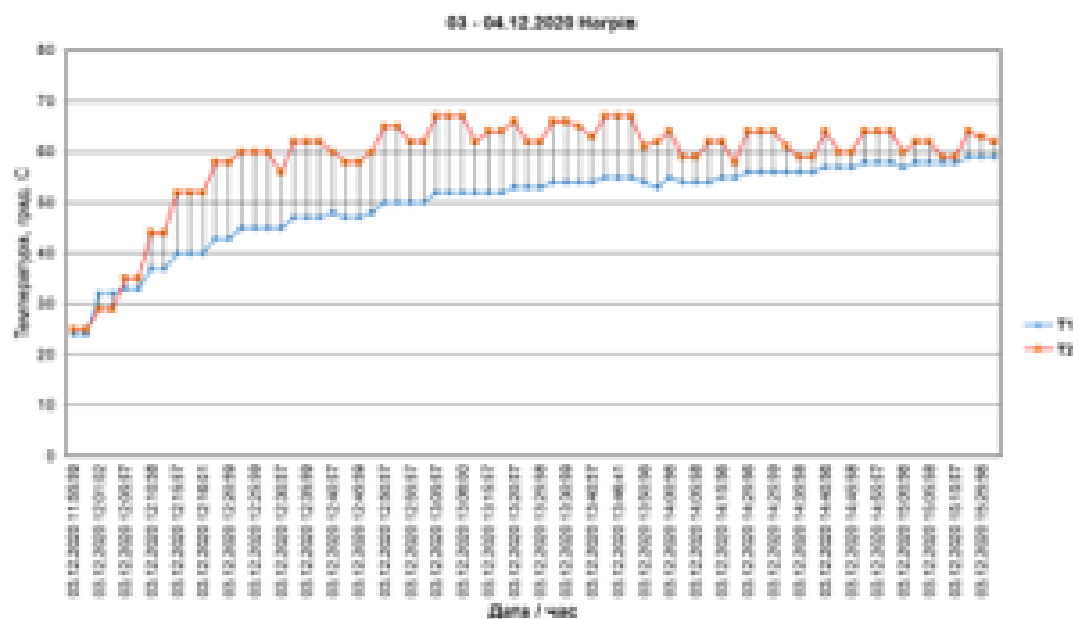


Рисунок 4 - Дослідження мобільного теплового акумулятора контейнерного типу МТА-0,5МВт в період з 3.12 по 4.12.2020

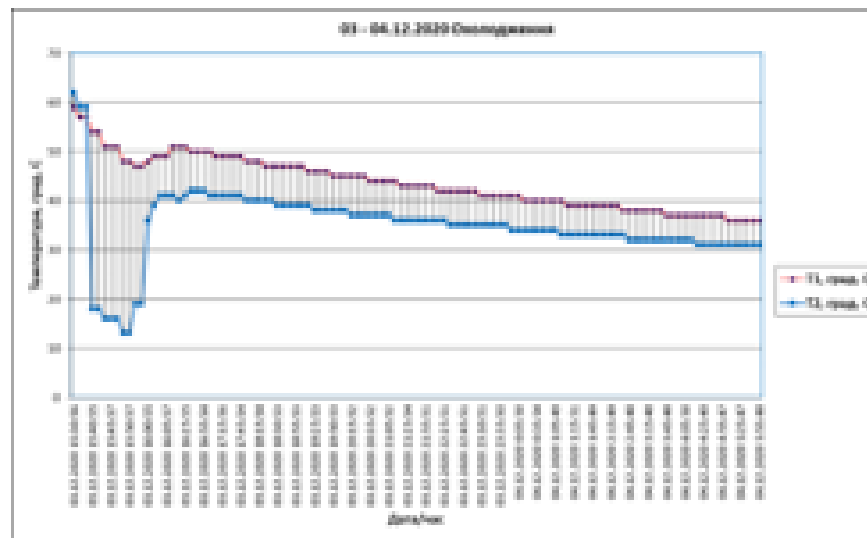


Рисунок 5. - Дослідження охолодження мобільного теплового акумулятора контейнерного типу МТА-0,5МВт з 03.12.2020 по 04.12.2020

5.5 На рисунку 6 наведені дослідження охолодження МТА з відключеними контурами А, В і С в статії (імітація транспортування МТА на велику відстань). Температура довкілля дорівнювала 0 °С (таблиця 1).

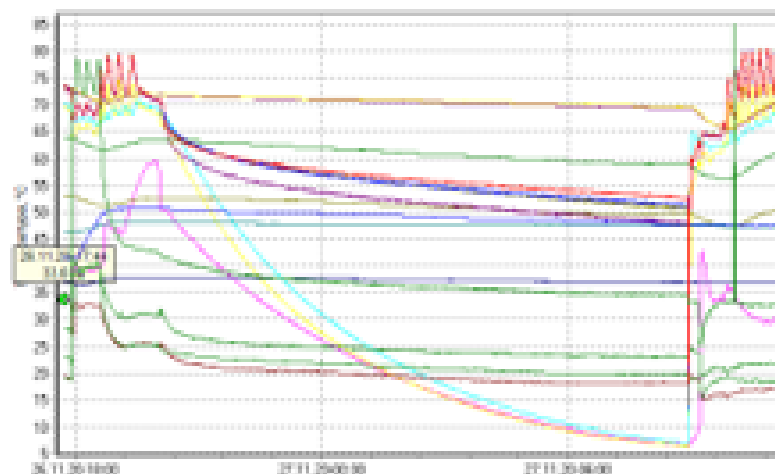


Рисунок 6 - Дослідження тепловтрат при транспортуванні мобільного теплового акумулятора контейнерного типу МТА-0,5МВт

Рисунок 5. - Дослідження охолодження мобільного теплового

Початкова температура баків-акумуляторів станом на 19.00 27.11.2020 складала 72 °С. Через 12 годин 12.00 28.11.2020 вона зменшилася на 1,0 °С і дорівнювала 71 °С.

5.6 Попередньому дослідженню передувало проведення тепловізійної зйомки МТА – тепловізором Ti-160 та пірометром CEM DT-8867H, у нічний час, при температурі -1,0 °С.

5.7 На рисунку 7 наведені результати дослідження охолодження МТА з включеними контурами А, В і С в динаміці (імітація довготривалого зберігання МТА при низьких температурах зовнішнього повітря). Температура оточуючого середовища коливалася в діапазоні від ± 0 °С до -9 °С (таблиця 1).

4.12.2020 об 11.20 було запинено циркуляцію теплоносія контуру D, вклучено насос контуру А, повністю відкрити усі байпаси. Система циркуляції здійснювалася насосом С між контуром С і Е, котел вклучено, та була залишена під тиском 2,0 бар. Всі дренажі закрити. Включена пожежна-охоронна сигналізація «PRO-X». Випробування завершено 09.12.2020

Віддалений дистанційний контроль за температурою T1 та T2 в контурі С здійснювали приладом «PRO-X». Об'ємна витрата теплоносія – теплообчислювачем SCYLAR. Витрата електричної енергії – лічильником електроенергії MTX 1A10.DF.2L0-PD4 «Matrix AMM».

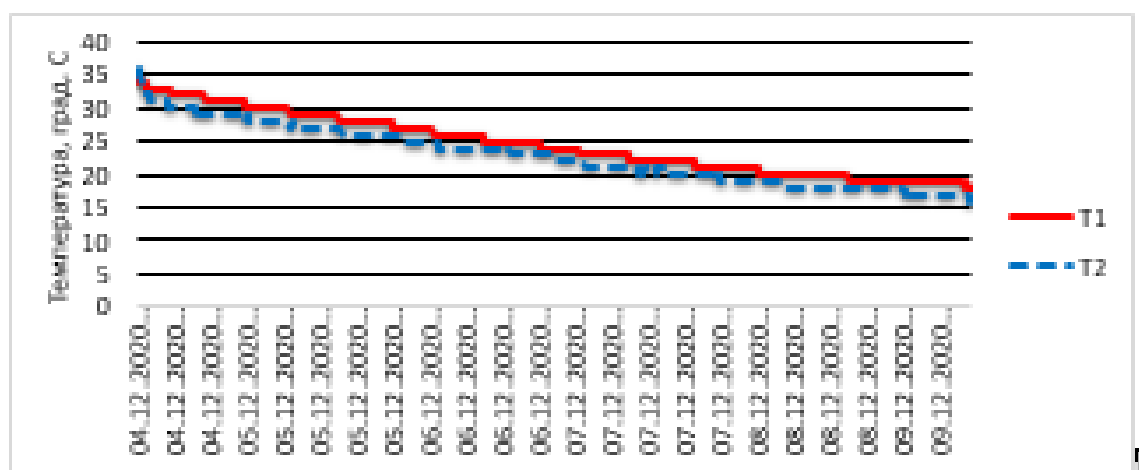


Рисунок 7 – Зміна температур T1 та T2 контуру С в період 04 – 09.12.2020

¶

Контроль за температурами контурів А та В здійснювався приладом TRITON 6004ТС з комутаційним модулем TRITON С37 та датчиками температури АТФ А.687265.016.¶

Примітка: Більш детальну інформацію про умови проведення дослідів та дані окремих досліджень наведено у зведеному електронному Excel-файлі, який додано до протоколу.¶

Встановлено:¶

Отримані дані наглядно підтверджують, можливість зберігання МТА на відкритих площадках при від’ємних температурах за умови забезпечення циркуляції теплоносія в контурах А, В і С. У разі відсутності такої можливості МТА повинен бути законсервований згідно відповідних вимог Паспорту МТА 00.00.000-ПС.¶

Науковий керівник НТР, зав. ЛПТТ ІТТ Ф НАНУ, к.т.н. Демченко В.Г.¶

Провідний науковий співробітник ЛПТТ ІТТ Ф НАНУ, к.т.н. Коник А.В.¶

Головний інженер проекту ЛПТТ ІТТ Ф НАНУ Фалько В.Ю.¶

Головний технолог ЛПТТ ІТТ Ф НАНУ Макаренко Л.А.¶

Інженер 1 категорії ЛПТТ ІТТ Ф НАНУ → → → → Каменьков Г.Б.¶

ДОДАТОК 3

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Директор ІТТФ НАН України
Академіку НАН України


В.Ф. Снежкін
28 квітня 2023 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Директор МРЦ МВС України
«Кремінці»


О.М. Домброван
28 квітня 2023 р.

АКТ
впровадження
мобільного теплового акумулятора МТА – 0,5 МВт

Підстави проведення
дослідної експлуатації:

1. Договір №11-22/927 від 9.12.2022 «Проведення дослідної експлуатації»;
2. Акт №1 від 9.12.2022 «Приймання-передачі обладнання для дослідної експлуатації»

Ми, що нижче підписалися, завідувач лабораторії «Процесів та технологій теплозабезпечення» ІТТФ НАН України, к.т.н. Демченко В.Г., провідний науковий співробітник лабораторії «Процесів та технологій теплозабезпечення» к.т.н. Коник А.В., Начальник відділу ДНДІ МВС України к.ю.н. Рибий С.М. з однієї сторони, та т.в.о. заступника директора, технік МРЦ МВС України «Кремінці» Доценко Є.В., механік МРЦ МВС України «Кремінці» Назаров В.А., інженер з охорони праці, механік МРЦ МВС України «Кремінці» Яновська М.М. склали цей акт в тому, що в опалювальний період 2022 – 2023 років за технічною документацією, розробленою лабораторією «Процесів та технологій теплозабезпечення» проведені роботи по натурному випробуванню дослідного зразка мобільного теплового акумулятора МТА-0,5 МВт на території Медичного реабілітаційного центру МВС України «Кремінці», що знаходиться у с. Татарів Івано-Франківської області. Результати при експлуатації протягом 135 годин роботи показали наступне: економія

електроенергії склала 2700 кВт-год, що в грошовому вимірі відповідає економії 13867 грн. за цей період.

Завідуючий лабораторії ПТТ
к.т.н., с.н.с.

 В.Г. Демченко

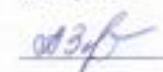
«__» _____ 2023 р.

Т.з.о. заступника директора, технік
МРЦ МВС України «Кременіці»

 С.В. Доценко

«__» _____ 2023 р.

Провідний наук. спів. лабораторії ПТТ
к.т.н., с.н.с.

 А.В. Конник

«__» _____ 2023 р.

Механік МРЦ МВС України
«Кременіці»

 В.А. Назаров

«__» _____ 2023 р.

Начальник відділу ДНДІ МВС
України
к.з.н.

 С.М. Рябий

«__» _____ 2023 р.

Інженер з охорони праці, механік
МРЦ МВС України «Кременіці»

 М.М. Яровська

«__» _____ 2023 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Директор ІТТФ НАН України
Академіку НАН України


О.Ф. Святкін
" " 2023 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Директор МРЦ МВС України
«Кремінці»


О.М. Домброван
" " 2023 р.

АКТ впровадження результатів науково-дослідної роботи

Науково-дослідна робота, що була виконана науковими працівниками: завідувачим лабораторії «Процесів та технологій теплозабезпечення» ІТТФ НАН України к.т.н., с.н.с. Демченко В.Г., провідним науковим співробітником лабораторії к.т.н., с.н.с. Коник А.В., головним інженером проекту лабораторії Фалько В.Ю. і директором Державного науково-дослідного інституту МВС України директором ДНДІ МВС України Вербеньським М.Г., заступником директора ДНДІ Смеринським Д.В., начальником відділу ДНДІ Рибим С.М. спрямована на розробку практичних рекомендацій щодо впровадження теплових акумуляторів в систему теплозабезпечення віддалених окремоствовчених будівель та використання мобільних теплових акумуляторів при виникненні надзвичайних ситуацій.

Застосування результатів роботи дозволи зекономити 2700 кВт·год, що в грошовому еквіваленті складає 13867 грн. при експлуатації дослідного траска мобільного теплового акумулятору МТА-0,5МВт протягом 135 годин. Експериментальні дослідження відбувались на території Медичного реабілітаційного центру МВС України «Кремінці», що знаходиться у с. Татарів Івано-Франківської області у опалювальний період «грудень 2022 року - квітень 2023 року».

Директор МРЦ МВС України
«Кремінці»
Завідувач лабораторії ІТТФ,
к.т.н., с.н.с.
Провідний науковий співр.
лаб. ІТТ, к.т.н., с.н.с.


Домброван О.М.

Демченко В.Г.

Коник А.В.

Головний інженер проекту
лаб. ПТТ
Директор ДНДІ МВС
України
Заступник директора ДНДІ
МВС України
Начальник відділу ДНДІ



Фалько В.Ю.

Вербенський М.Г.

Смерницький Д.В.

Рябий С.М.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Директор ІТТФ НАН України
Академіку НАН України


«__» _____ 2023 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Директор МРЦ МВС України
«Кремінці»


«__» _____ 2023 р.

АКТ
КОМІСІЇ ПРО ПРИЙНЯТТЯ УСТАТКУВАННЯ
ПІСЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ВИПРОБУВАННЯ

с. Татарів

«__» _____ 2023

Комісія призначена
для Медичного реабілітаційного центру МВС України «Кремінці»
(назва організації замовника, яка призначила роботу комісії - назвою № від _____)

Голови-представника замовника
Допенко Свєтлїй Володимирович, т.в.о. заступника директора, технік МРЦ МВС
України «Кремінці»
(прізвище, ім'я, по-батькові, посада) члена комісії від замовника)

Назаров Володимир Анатолійович, механік
(прізвище, ім'я, по-батькові, посада)

Яновська Марта Михайлівна, інженер з охорони праці, механік
(прізвище, ім'я, по-батькові, посада)

Представники ІТТФ НАН України

Демченко Володимир Георгійович, завідуючий лабораторії ПТТ, к.т.н., с.н.
(прізвище, ім'я, по-батькові, посада)

Коник Аліна Василівна, провідний науковий співробітник лаб. ПТТ, к.т.н., с.н.с.
(прізвище, ім'я, по-батькові, посада)

Фалько Володимир Юрійович, головний інженер проекту
(прізвище, ім'я, по-батькові, посада)

Представники НДІ МВС України

Вербенський Михайло Георгійович, директор ДНДІ МВС України
(прізвище, ім'я, по-батькові, посада)

Смерницький Дем'ян Вікторович, заступник директора ДНДІ МВС України
(прізвище, ім'я, по-батькові, посада)

Рябий Сергій Михайлович, начальник відділу ДНДІ МВС України
(прізвище, ім'я, по-батькові, посада)

ВСТАНОВИЛА

1. УСТАТКУВАННЯ Дослідний зразок мобільного теплового акумулятору МТА-0,5МВт (далі по тексту МТА-0,5МВт)

МТА-0,5МВт

(найменування устаткування, техніко-експлуатаційні дані, обладнання)

Встановленого біля котельні №2, що розташований по вул. Шевченко 1, с. Татарів Івано-Франківська область, Україна

(найменування будівлі)

Що входить до складу:

МРЦ МВС України «Кремінці»

(найменування підприємства)

Пройшло комплексне випробування, включаючи необхідні пуско-налагоджувальні роботи з разом комунікаціями.

З « 9 » грудня 2022 року по « 15 » квітня 2023 року

протягом 128 днів (3072 годин) відповідно до встановленого порядку МРЦ МВС України «Кремінці».

2. Висновок

Мобільний тепловий акумулятор МТА-0,5МВт і допоміжне обладнання витримали випробування і придатні для постійної експлуатації

Комплексне випробування включало необхідні пусконаладжувальні роботи, виконано за затвердженою «Програмою»,

(найменування документа, за яким здійснювалось комплексне випробування)

3. Дефекти проектування, виготовлення і монтажу мобільного теплового акумулятору МТА-0,5МВт в процесі комплексного випробування не виявлені та відсутні.

Рішення комісії

Мобільний тепловий акумулятор МТА-0,5МВт, що пройшов комплексне випробування, вважати готовим до експлуатації, передбаченої проектом в об'єкті, що відповідає нормам освоєння проектних потужностей в початковий період і прийнятим з «22» квітня 2023 року в постійну експлуатацію.

Рекомендовано розглянути можливість подальшої експлуатації мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт на території МРЦ МВС України «Кременіці» на постійній основі.

Голова комісії МРЦ МВС України «Кременіці»

Доценко Святій Володимирович, т.в.о. заступника директора, технік МРЦ МВС України «Кременіці»

(прізвище, ім'я, по-батькові, посада)

Члени комісії

Завідуючий лабораторії ПТТ,
к.т.н., с.н.с.

Провідний науковий співр.
лаб. ПТТ, к.т.н., с.н.с.

Головний інженер проекту
лаб. ПТТ

Директор ДНД МВС
України

Заступник директора ДНД
МВС України

Начальник відділу ДНД

Т.в.о. заступника директора,
технік МРЦ МВС України
«Кременіці»

Механік МРЦ МВС України
«Кременіці»

Інженер охорони праці,
механік МРЦ МВС України
«Кременіці»

Демченко В.Г.

Коник А.В.

Филько В.Ю.

Вербенський М.Г.

Смерницький Д.В.

Рябий С.М.

Доценко С.В.

Назаров В.А.

Яновська М.М.