ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Коник Аліни Василівни «Теплофізичні основи систем дискретного опалення з застосуванням теплових акумуляторів ємнісного типу»**, яку подано на здобуття наукового ступеня доктора технічних за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

1. Актуальність теми дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота присвячена проблемі транспортування теплової енергії за допомогою мобільних теплових акумуляторів, вирішенню науково-прикладної проблеми розвитку теплофізичних основ процесів акумулювання теплової енергії із залученням механізмів фазового переходу плавлення і затвердіння та застосування теплоакумулюючих матеріалів, що використовуються в температурному діапазоні до 120°С. Пілотні проєкти мобільного теплового акумулювання в зазначеному діапазоні температур у європейських країнах застосовуються як джерела живлення переважно об'єктів зеленої енергетики – сонця і геотермальних джерел, що свідчить про актуальність розвитку даного напрямку. Широке застосування мобільних теплових акумуляторів може забезпечити теплом приватні будівлі та важливі інфраструктурні об'єкти, що залишились без опалення внаслідок військових дій. Вирішення цієї задачі є важливим соціальним завданням.

З огляду на вище зазначене тематика дисертаційних досліджень є важливою науково-технічною проблемою і є актуальною.

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

Дисертаційна робота виконувалася у відповідності з науковою тематикою Інституту технічної теплофізики НАН України у відділі тепломасообміну та гідродинаміки в елементах теплоенергетичного устаткування та пов'язана з державними тематиками 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);

- «Розвиток наукових засад теплової взаємодії будівлі з довкіллям та підвищення її енергоефективності на основі застосування інтелектуальних систем енергозбереження» 1.7.1.894 (2020-2024 рр., № ДР 0120U101228);
- «Розроблення і оптимізація енергозберігаючих систем геотермальної вентиляції для енергоефективних будинків» 1.7.1.898 (2020-2022 рр., № ДР 0120U101263).

3. Наукова новизна роботи та важливість одержаних результатів

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

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

- вперше аналітично досліджено процес теплообміну в середині «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 (числа 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 граток 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 теплоакумулюючої рідини на основі водорозчинних полімерів протягом використання чотирьох опалювальних сезонів, а саме питомої теплоємності, термоциклічності, густини, водневого показника.

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

4. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій сформульованих у дисертаційній роботі та їх достовірність.

Достовірність отриманих наукових положень підтверджується застосуванням сучасних методів проведення експериментальних досліджень, засобів вимірювань, методів математичного моделювання та підтверджується відповідністю розрахунків за розробленими моделями результатам експериментальних досліджень та промислових випробувань.

5. Практична цінність одержаних результатів.

За результатами математичного моделювання і комплексних експериментальних досліджень створено систему дискретного опалення із застосуванням мобільного теплового акумулятора, що складається з індивідуального теплового пункту оснащеного вимірювальним обладнанням для дистанційного моніторингу роботи обладнання та секції акумуляції. Остання містить блок ємнісних теплових акумуляторів оптимізованої конструкції з трьома робочими тілами. Практичну і наукову значимість оптимізованої конструкції підтверджено патентом на винахід України.

Надійність та працездатність запропонованої дискретної системи опалення підтверджує стабільність експлуатаційних характеристик системи на протязі чотирьох опалювальних періодів.

Запропонована ефективна конструкція ємнісних теплових акумуляторів, в якій окрім води застосовуються дві теплоакумулюючі речовини – композиція теплоакумулюючої рідини та підібраний природний матеріал з фазовим переходом. Їх сумісне застосування дозволяє в цілому підвищити акумуляційну здатність і подолати теплову стратифікацію в акумулюючій ємності.

За результатами комплексних досліджень створено і використано нову вибухо- і пожежобезпечну композицію теплоакумулюючої рідини та вибрано матеріал з фазовим переходом «плавлення - затвердіння», що дозволило оптимізувати характеристики теплового акумулятора.

Математичні аспекти моделювання тепломасообмінних та гідродинамічних процесів мобільного теплового акумулювання використані в розробці методик освітніх програм і викладаються бакалаврам і магістрам Національного технічного університету України «Київський політехнічний

інститут ім. Ігоря Сікорського». У додатках дисертаційної роботи містяться відповідні копії актів про використання наукових результатів.

6. Структура та обсяг роботи

Представлена дисертаційна робота є завершеною науковою працею, загальним обсягом 386 сторінки, серед яких 288 сторінок основного тексту, 20 таблиць та 105 ілюстрацій. Робота складається зі вступу, висновків, додатків та семи розділів. У переліку посилань зазначено 235 джерела.

Автореферат повністю відповідає матеріалам, викладеним в дисертації.

В анотації стисло наведені основні результати досліджень процесів, що протікають в акумуляторах теплової енергії в періоди її накопичення та відпуску зовнішнім споживачам, короткий огляд матеріалів семи розділів дисертації, наукова новизна та практична цінність одержаних результатів, матеріали апробації та перелік публікацій по дисертації.

У вступі розкрито актуальність обраної теми, яка 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 пожежобезпечні теплоакумуляційні речовини, що дозволяє доставляти теплову енергію громадськими шляхами споживачу. Визначено мету і сформульовано завдання дисертаційного дослідження, зазначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, представлено інформацію про апробацію результатів роботи та їх відображення в наукових публікаціях автора. Крім того, наведено основні відомості, які є необхідними для вступної частини дисертаційної робот.

Перший розділ містить оглядові матеріали присвячені механізмам акумулювання теплової енергії під час її транспортування мобільними методами. Розглянуто методи акумулювання теплової енергії, наведені приклади застосування мобільних теплових акумуляторів. Особливу увагу зосереджено на використанні матеріалів із фазовим переходом у ємнісних акумуляторах, методах їх вибору та дослідженню їх робочих характеристик. Представлено варіанти розташування матеріалу з фазовим переходом в ємності та особливості їх розташування при транспортуванні.

Другий розділ присвячено огляду методів математичного моделювання процесів перенесення, що мають місце під час накопичення теплової енергії в акумуляторах теплоти різних типів. Переважна більшість задач, що стосуються фізико-математичного моделювання процесів тепломасоперенесення та гідро-

газодинаміки, як правило, зводиться до вирішення диференціальних рівнянь різного ґатунку. Одним з методів вирішення диференціальних рівнянь в частинних похідних, які описують нестаціонарні процеси накопичення теплової енергії в акумуляторах теплоти, є метод симетрії, аналіз застосування якого розглянуто в даному розділі.

Надана нестаціонарна модель осцилюючого потоку рідини в плоских і циліндричних каналах із пористим середовищем. Для розв'язання диференціальних рівнянь моделі осцилюючого потоку розглянуто метод граток Больцмана, як клас методів обчислювальної гідродинаміки для моделювання рідин, що рухаються з малими швидкостями в обмеженому просторі сипучої насадки теплових акумуляторів.

Розглянуто також методи молекулярної динаміки та дисипативних частинок.

Третій розділ дисертаційної роботи присвячено моделюванню теплообмінних і гідродинамічних процесів, що відбуваються в акумуляційних ємностях. Виконано дослідження процесів теплообміну всередині труби заповненої речовиною з фазовим переходом. Визначено залежність теплоємності речовини від температури, а також зміну ентальпії під час нагрівання в межах температурного діапазону роботи мобільного теплового акумулятору, що створюється. Досліджено стаціонарний та нестаціонарний комплексний теплообмін під час плівкового кипіння за умов відсутності механічної взаємодії на межі фаз пара-рідина та за спокійного стану рідини за межами парової плівки, що є обмежуючим фактором при транспортуванні теплової енергії мобільним способом.

Розглянуто нестаціонарну модель осцилюючого потоку рідини в плоских і циліндричних каналах із пористим середовищем, що дозволяє оцінити вплив осциляцій на характер руху потоку теплоносія. Проведено верифікацію аналітичних даних та результатів чисельного моделювання, зазначено високу ступінь узгодженості.

Четвертий розділ присвячено створенню і дослідженню властивостей теплоакумуюючої рідини, що розміщується в ємностях теплових акумуляторів.

Виконано аналіз щодо принципу вибору речовин та наведені матеріали, що увійшли до складу теплоакумулюючої рідини з урахуванням фактору вибухо- і пожежобезпечності. Розроблені методики досліджень теплоакумулюючої здатності методом T-history – питомої теплоємності,

густини, водневого показника теплоакумулюючої рідини. Створено необхідні експериментальні стенди. Наведені результати експериментальних досліджень методом T-history на основі яких встановлено оптимальний склад теплоакумулюючої рідини, до якої входить вода, антифриз, ксантанова і гуарова камедь. Встановлено незмінність водневого показника теплоакумулюючої рідини у діапазоні температур від 20 до 90°С в мобільному тепловому акумуляторі МТА-0,5МВт протягом чотирьох опалювальних сезонів.

П'ятий розділ містить матеріали моделювання процесів формування просторових наноструктур у теплоакумулюючій рідині. Застосовано дворівневу модель, розроблену на основі методів молекулярної динаміки та дисипативних частинок. Надані результати комп'ютерного моделювання процесів утворення структури в колоїдних системах теплоакумулюючого матеріалу з застосуванням програм Scalable molecular dynamics NAMD та Visual Molecular Dynamics для візуалізації результатів. Надані результати чисельного моделювання процесів утворення різних видів міцел і формування їх структур, отримані зображення структурних колоїдних одиниць. Задовільна відповідність результатів моделювання різних видів міцел з фотографіями, отриманими за допомогою електронного мікроскопа, підтверджує високу узгодженість зображень. Результати досліджень експериментальної і розрахункової структур системи, що містять помітні глобулярні структури колоїдних часток, якісно добре корелюються, що свідчить про адекватність застосування даної моделі для акумуляційних рідин.

Шостий розділ дисертаційної роботи присвячено вибору і дослідженню теплофізичних властивостей матеріалу з фазовим переходом, яким заповнюється труба типу триплекс і розміщується в центрі ємностей теплових акумуляторів. Представлено підходи за якими здійснювали вибір природної речовини з фазовим переходом, враховуючи особливості використання при транспортуванні мобільними тепловими акумуляторами. Виконано дослідження питомої теплоємності ряду зразків матеріалів з фазовим переходом в залежності від зміни температури у діапазоні від 30 до 90°С: парафінів – петролатуму і церезину та віск – озокерит і вибрано церезин як природну речовину зі складним піком фазового переходу в найширшому діапазоні температур і який має найвищу теплоту фазового перетворення.

Сьомий розділ дисертаційної роботи присвячено створенню конструкції мобільного теплового акумулятора, формулюванню основних підходів в

розробці даного типу обладнання. Розділ містить розрахунки основних технологічних і технічних параметрів складових дослідного зразка МТА-0,5МВт. Приведено результати експериментальних досліджень роботи дослідного зразка мобільного теплового акумулятора МТА-05МВт. Представлено концепт застосування дискретної системи опалення при використанні розробленого дослідного зразка мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт. Частину технічних параметрів складових МТА-0,5МВт, їх опис та результати досліджень подано у додатках даної роботи. До додатків віднесено акти впровадження дослідного зразка МТА-0,5МВт в медико-реабілітаційному центрі МВС України та копії актів використання наукових результатів дисертаційної роботи.

Розділи дисертаційної роботи закінчуються «Висновками за розділом», де зазначено основні результати і сформульовано висновки отримані саме в цій частині. У загальних висновках представлено ключові результати дисертаційної роботи, які відображають отримані дані в результаті проведеного математичного моделювання та комплексних експериментальних досліджень, викладених у відповідних розділах роботи.

7. Повнота опублікування основних положень дисертаційної роботи.

Основні положення та результати дисертаційної роботи викладено в 40 наукових працях, у тому числі: 8 статей, що входять до наукометричних баз Scopus і Web of Science, 9 публікації в наукових журналах, що входять до переліку фахових видань, 4 статті у виданнях, які включено до міжнародних наукометричних баз даних; 15 публікацій у збірниках матеріалів і тез конференцій, отримано 2 патенти України на винахід.

8. Відповідність дисертації встановленим вимогам.

Дисертаційна робота відповідає вимогам МОН України стосовно наявності результатів проведених досліджень та отриманих науково-обгрунтованих рішень. Автореферат та основні положення дисертації ідентичні за змістом.

9. Оформлення дисертації.

Дисертація оформлена згідно вимогам МОН України; в роботі наведена достатня кількість ілюстративного матеріалу.

10. Недоліки і зауваження до представленої дисертаційної роботи.

1. В розділі №3 розглядається задача конвективно-радіаційного теплообміну при плівковому кипінні рідини на вертикальній нагрітій стінці, зануреній у

великий об'єм води. Плівкове кипінні рідини може відбуватися в акумуляторах киплячого типу при високих теплових навантаженнях. Оскільки в дисертації розглядаються теплові акумулятори лише з нагріванням рідини та плавленні церезиту, було б доцільним навести конструктивні схеми та параметри акумуляторів теплоти, де робочі процеси відбуваються з утворенням пари в режимі плівкового кипіння.

2. В результаті аналізу серії дослідів циклів «нагрівання-охолодження» з різними теплоакумулюючими рідинами (розділ №4) запропоновано оцінювати (дослівно) ефективність теплоакумулюючої рідини на основі співвідношення витраченої енергії до часу проведення циклу. При цьому, найменший час циклу був для води, а максимальний – для рідини, до складу якої входить антифриз і ксантанова камедь, 1 % , рис. 4.2.1. Щодо усередненого значення споживання енергії за цикл, навпаки – максимальне значення було для води, а мінімальне – для рідини рис.4.2.2. Отже, був зроблений висновок, що 1 варіант (з водою) є найменш ефективний, оскільки вимагає значного підведення енергії при мінімальному часі акумуляції, а з рідиною у складі антифриза та 1% ксантанової камеді – найбільш ефективний. Дане ствердження потребує пояснення, оскільки з точки зору споживача акумулятор теплоти і повинен бути максимально зарядженим за мінімальний час, а розряджання акумулятора – здійснюється в режимі регульованого відпуску теплоти відповідно до потреби споживача.

3. В роботі за теплоту фазового перетворення прийнято величину, яка обчислюється шляхом інтегрування надлишкової теплоємності по температурі в інтервалі температур початку та кінця умовного фазового переходу. Але для церезину температура плавлення становить 60 – 80 °С, а інтегрування починається з температури 32,5 °С. Отже отримана величина фазового перетворення 1157,12 кДж/кг включає теплоту, що витрачена і на фазовий перехід, і на підвищення ентальпії церезину в процесі нагрівання до температури плавлення. Тому, по-перше, виникає сумнів щодо коректності назви отриманої величини. По-друге, виникає питання, чому не проведено класичний експеримент з отримання теплоти плавлення за допомогою калориметра.

4. Відповідно до результатів досліджень заповнене церезином теплове ядро має високе значення теплоти фазового перетворення (1157,12 кДж/кг), яке суттєво переважає теплоємнісні характеристики термоакумулюючої рідини. Потребує

пояснень, чому в запропонованій конструкції акумулятора теплове ядро займає всього 10% від загального об'єму акумулятора, а не, наприклад, 70% ?

5. В розділі №3 виконано моделювання процесів теплообміну всередині «теплового ядра» заповненого матеріалом з фазовим переходом між двома циліндрами. Аналіз виконано за спрощених умов – при відсутності конвекції рідкого розплаву після танення. Крім того, в наявному тепловому акумуляторі внутрішня стінка труби теплового ядра містить високі повздовжні ребра, (рис.7.1.1) площа теплообміну яких в 4 рази перевищує площу теплообміну стінки труби. Оскільки інтенсивність тепловіддачі до церезиту низька, ребра повинні мати високу ефективність і суттєво впливати на розподілення температури. Цей фактор відсутній в аналізі роботи теплового ядра акумулятора.

6. В інженерних розрахунках час розряджання рідинного теплового акумулятора визначають за співвідношенням, яке включає масу та теплоємність акумулюючої рідини, поверхню теплообміну змійовика, коефіцієнт теплопередачі, витрату охолоджувальної рідини та під логарифмом початкові температури рідини та теплоносія, та кінцеву температуру рідини в акумуляторі. В дисертації (7 розділ) пропонується орієнтовний час розряджання акумулятора розраховувати як відношення акумульованої теплоти до (дослівно) теплових втрат без деталізації останніх. З дисертації також не зрозуміло, чи являються отримані результати узагальненими і універсальними для використання в разі зміни геометричних конфігурацій акумуляторів.

7. Під час оформлення дисертації допущені неточності в позначеннях, наприклад, на рис. 4.2.6, та 4.2.7 кількість акумульованої теплоти надано в одиницях потужності – кВт, а не в кВт.год, або кДж; на рис. 7.3.7, 7.3.8, 7.8.12 відсутня ідентифікація кривих на графіках, а в табл.4.5 нерозбірливі зображення чисел на осі абсцис.

8. В тексті дисертації трапляються граматичні помилки.

Зроблені зауваження не зменшують цінності основних наукових положень, висновків і рекомендацій, що захищаються дисертантом, і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

11. Висновки.

Дисертаційна робота Коник Аліни Василівни є завершеним науковим дослідженням, в якому отримані нові науково обґрунтовані результати, що вирішують проблему транспортування теплової енергії за допомогою мобільних

теплових акумуляторів для забезпечення теплом споживачів при порушенні класичної схеми теплопостачання, або внаслідок військових дій об'єктів критичної інфраструктури.

Наукові положення та сформульовані висновки та рекомендації є достовірними і обґрунтованими, оскільки базуються на загальноприйнятих апробованих методах експериментальних досліджень із застосуванням сучасного вимірювального обладнання, адекватних математичних моделей процесів перенесення в теплових акумуляторах, застосуванні потужного математичного апарату для їх вирішення.

Практичне значення полягає в тому, що отримані аналітичним та експериментальним шляхом результати покладено в основу створення конструкції мобільного теплового акумулятора, робочі характеристики якого підтверджені натурними дослідно-експлуатаційними дослідженнями в реальних умовах протягом чотирьох опалювальних сезонів на двох локаціях.

Зміст автореферату повністю відповідає тексту дисертації, а основні наукові положення, що містяться в них, ідентичні.

За напрямком обраних та вирішених питань дисертаційна робота відповідає спеціальності 05.14.06 – "Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика " та профілю спеціалізованої вченої ради Д26.224.01.

На підставі вищевикладеного вважаю, що дисертаційна робота Коник Аліни Василівни "Теплофізичні основи систем дискретного опалення з застосуванням теплових акумуляторів ємнісного типу " відповідає вимогам пунктів 7, 8 та 9 «Порядку присудження та позбавлення ступеня доктора наук» Постанови Кабінету міністрів України від 17 листопада 2021 р. № 1197 (зі змінами внесеними згідно Постанови Кабінету Міністрів України, від 1 серпня 2025 р.) та паспорту спеціальності 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика, а її авторка заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Офіційний опонент, завідувач кафедри
теплоенергетики тахолодильної техніки
Національного університету
харчових технологій МОН України,
доктор технічних наук, доцент Валентин ПЕТРЕНКО

завіряю