

ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, завідувача відділом технологій альтернативних палив,
старшого наукового співробітника Інституту газу НАН України

П'яних Костянтина Євгеновича

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 наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Актуальність вибору теми дисертаційних досліджень.

Тема дисертаційних досліджень відповідає вимогам часу. Можливість вирішення задачі забезпечення теплом будівель і різноманітних об'єктів, які з різних причин не мають доступу до джерел теплової енергії є актуальним і важливим завданням.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню питань створення системи дискретного опалення з використанням мобільних теплових акумуляторів, які доставляються транспортом і забезпечують постачання теплової енергії споживачу. Основним елементом мобільного теплового акумулятору є секція акумуляції, в якій для збільшення об'єму накопиченої теплової енергії використано робочі тіла з фазовим переходом. Цей напрямок активно розвивається в країнах Європейського союзу та Азії. Проекти з транспортування низькопотенційної енергії від геотермальних джерел впроваджені в Польщі. В Німеччині мобільні накопичувачі теплоти працюють в ширшому діапазоні температур, однак для кожного діапазону температур створюються різні композиції теплоакумулюючих речовин, що реалізують механізми термохімічного і латентного зберігання теплової енергії. Потрібно зауважити, що країни Європейського Союзу мають розвинуту законодавчу базу для транспортування теплової енергії наземним мобільним способом. В Україні таких законодавчих актів на сьогодні не існує. Тому,



аккумуляційне обладнання, яке постачається транспортом, може працювати в обмеженому діапазоні температур. В представленій дисертаційній роботі ця проблема вирішується шляхом оптимізації ємнісних акумуляторів та застосуванням робочих тіл, що працюють в діапазоні температур до 100°C. В роботі також розглянуті питання створення нових робочих тіл – теплоакумулюючих речовин, що є актуальною задачею. В результаті комплексних експериментальних і теоретичних досліджень створено нову композицію теплоакумулюючої речовини на основі безпечних речовин природного походження.

В цілому, актуальність поставлених задач досліджень і важливість мети дисертаційної роботи не викликає сумніву. Важливість забезпечення постачання теплової енергії в умовах відсутності трубопровідного транспорту сьогодні ні в кого не викликає сумнівів.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та їх достовірність.

Дисертаційна робота є завершеною самостійною науковою працею, загальний обсяг якої складає 386 сторінок, серед яких 288 сторінки основного тексту. Робота складається з вступу, семи розділів, висновків і додатків. Перелік використаних джерел налічує 235 джерела, 20 таблиць та 105 ілюстрацій.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та задачі дисертаційних досліджень, представлено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів. Висвітлено апробацію результатів та їх відображення у публікаціях дисертанта, також наведено основні відомості необхідні у вступній частині дисертаційної роботи.

У *першому розділі* наведено аналітичні матеріали літературних джерел стосовно механізмів акумулювання теплової енергії при її транспортуванні автомобільним способом. Приділено увагу застосуванню матеріалів з фазовим

переходом в ємнісних акумуляторах методам їх застосування та дослідженню їх властивостей.

У *другому розділі* описано методи математичного моделювання які було застосовано в дисертаційній роботі. Так, метод симетрії застосовано при моделюванні стаціонарного та нестаціонарного комплексного теплообміну при плівковому кипінні. При верифікації аналітичних даних отриманих при моделюванні осцилюючого середовища в пористому середовищі застосовано метод ґраток Больцмана. Методи молекулярної динаміки та дисипативних частинок використано для побудови дворівневої моделі при дослідженні співвідношення потенціалів теплоакумуючої рідини.

У *третьому розділі* виконано комплексне теоретичне дослідження теплових процесів, характерних для теплового акумулятора з фазовим переходом, із застосуванням розвинутого математичного апарату нестаціонарної теплопровідності, гідродинаміки та радіаційно-конвективного теплообміну. Запропоновані математичні моделі базуються на фундаментальних рівняннях збереження енергії та імпульсу і дозволяють адекватно описати фізичну поведінку реального об'єкта - теплового акумулятора з фазозмінним матеріалом у широкому діапазоні режимів роботи. Проведено моделювання процесів теплообміну всередині труби (теплового ядра), заповненої речовиною з фазовим переходом при плавленні і затвердінні. Визначено залежності зміни теплоємності речовини при зміні температури, а також зміни ентальпії при нагріванні у діапазоні температур від 30°C до 110°C.

Досліджено стаціонарний і нестаціонарний комплексний теплообмін при плівковому кипінні за умов відсутності механічної взаємодії на межі пара-рідина (модель Бромлі) та за умов «рідина у стані спокою поза паровою плівкою» (модель Елліона). Отримано аналітичний розв'язок задач стаціонарного режиму для граничних умов, заданих постійною температурою стінки та постійного теплового потоку. Показано вплив випромінювання та різниці температур між стінкою та

рідиною на профілі температури в паровій плівці. При вирішенні нестационарної задачі отримано залежну від часу зміну профілю температури та коефіцієнта тепловіддачі в паровій плівці. Показано вплив випромінювання (числа Старка) на коефіцієнт тепловіддачі.

Розроблено нестационарну модель осцилюючого потоку рідини у плоских та циліндричних каналах з пористим середовищем. Аналітичні дані і результати чисельного моделювання мають досить високу ступінь узгодженості. Показано, що поведінка осцилюючого потоку рідини при впливі осцилюючого градієнта тиску визначається двома безрозмірними параметрами числа Струхалія і числа Дарсі, проведено оцінку впливу кожного з параметрів.

У *четвертому розділі* представлено лабораторні стенди та прилади для проведення досліджень, методики проведення досліджень та їх результати. За результатами вибору складових теплоакumuлюючої рідини з огляду на специфіку використання у ємнісних акумуляторах, що транспортуються наземним транспортом в межах міської забудови, підготовлено дев'ять варіантів теплоакumuлюючого матеріалу. За результатами досліджень властивостей теплоакumuлюючої рідини отримано патент на винахід України, що підтверджує наукову новизну і практичну цінність результатів отриманих при виконанні задач дисертаційної роботи.

Важливим етап роботи, відображеним в матеріалах дисертації є розробка технології приготування розчинів, а також дослідження зміни їх теплофізичних характеристик в процесі експлуатації. Показано, що строк експлуатації теплоакumuлюючої рідини у теплових акумуляторах ємнісного типу об'ємом $1,5 \text{ м}^3$ становить не менше 2 - 4 років.

У *п'ятому розділі* проведено моделювання процесів динаміки формування просторових наноструктур теплоакumuлюючої рідини із застосуванням дворівневої моделі створеної на основі методів молекулярної динаміки та дисипативних частинок. Отримані результати моделювання співставлено з ілюстраціями

одержаними за допомогою електронного мікроскопа, необхідно відзначити їх помітну узгодженість.

Шостий розділ дисертаційної роботи присвячено вибору природньої речовини з фазовим переходом з урахуванням особливостей застосування у ємнісних теплових акумуляторах, що транспортуються. Обрано речовину з фазовим переходом природнього походження церезин, проведено дослідження її теплофізичних параметрів. Проведено дослідження термоциклувань (нагрів-оохолодження) матеріалу. Зроблено важливі висновки:

- теплоємність церезину практично не змінилась через 85 циклів;
- маса матеріалу змінилась в межах $1 \div 2$ % в процесі 40 циклів
- даний матеріал можливо використано для заповнення «теплового ядра».

В розділі ще раз підтверджено вибір церезину в якості акумулюючого матеріалу, оскільки його пік фазового переходу має найширший серед досліджуваних матеріалів діапазон температур - від 32,5 до 87,5 °С та найвищу теплоту фазового переходу - до 1157,12 кДж/кг.

У *сьомому розділі* наведено матеріали, в яких відображено етапи розробки конструкції мобільного теплового акумулятору, схема індивідуального теплового пункту на базі теплового акумулятора, методики його використання, а також результати досліджень параметрів роботи такого пункту в реальних експлуатаційних умовах. Розділ містить теплові і конструктивні розрахунки, технічні параметри мобільного теплового акумулятору та його складових, наведено інформацію щодо вимірювально-реєструючого обладнання та результати експериментальних досліджень акумуляції теплової енергії створеного дослідного зразка мобільного теплового акумулятора.

У **висновках** сформульовано основні результати дисертаційної роботи, що відображають результати проведеного математичного моделювання і комплексних експериментальних досліджень представлених у розділах роботи.

У додатках представлено матеріали науково-технічного характеру, що стосуються технологічних і конструктивних аспектів створення мобільного теплового акумулятора. Наведено результати натурних випробувань мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт і акт впровадження дослідного зразка МТА-0,5МВт в медико-реабілітаційному центрі МВС України.

Також, у додатках представлено копії актів використання наукових результатів дисертаційної роботи та актів впровадження практичних та наукових результатів отриманих в роботі.

В дисертаційній роботі на високому науковому рівні успішно вирішено науково-прикладну проблему транспортування теплової енергії мобільним способом, опрацьовано весь комплекс питань, необхідний для створення, впровадження та підтвердження експлуатаційних характеристик технології, спрямованої на вирішення проблеми забезпечення теплом будівель та споруд, віддалених від джерел тепlopостачання, а також постраждалих внаслідок військових дій чи надзвичайних ситуацій.

Наукові положення, висновки й рекомендації сформульовані у дисертаційній роботі є **достовірними і обґрунтованими**, що забезпечується використанням загальноприйнятих методик моделювання, які базуються на класичних аналітичних та чисельних методах. Проведено верифікацію отриманих в роботі експериментальних даних з результатами теоретичних досліджень. Точність результатів експериментальних досліджень забезпечується використанням адекватно підібраних сучасних вимірювальних приладів і засобів з використанням комп'ютерної обробки даних.

На підставі аналізу наукових результатів роботи можна вважати, що **вся дисертаційна робота Коник А.В. в цілому є кваліфікаційною науковою працею**, виконаною нею **особисто і має завершений характер**. За напрямом досліджень та результатами одержаними при її виконанні дисертаційна робота **відповідає паспорту спеціальності 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова**

теплоенергетика. При ознайомленні з матеріалами дисертаційної роботи опонент не знайшов ознак **академічного плагіату чи фальсифікацій**.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження.

Ознайомлення з рефератом та матеріалами дисертаційної роботи Коник А.В. дає можливість вважати, що отримані **наукові положення та обґрунтовані практичні результати є дійсно новими**, а роботу виконано на високому науковому рівні.

Основні аспекти наукової новизни, що виносяться на захист:

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 ґраток Больцмана. Показано, що поведінка осцилюючого потоку рідини при впливі

осцилюючого градієнту тиску визначається двома безрозмірними параметрами – числами Струхаля та Дарсі.

2. Вперше досліджено теплофізичні властивості новоствореної вибухо- і пожежобезпечної 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 теплоакумулюючої рідини.

Практичне значення одержаних результатів та рекомендації щодо їх застосування

За результатами математичного моделювання і комплексних експериментальних досліджень створено систему дискретного опалення із застосуванням мобільного теплового акумулятору, що складається з індивідуального теплового пункту оснащеного вимірювальним обладнанням для дистанційного моніторингу роботи обладнання та відділу акумуляції. Дискретну систему опалення було застосовано протягом чотирьох опалювальних періодів, що підтверджує надійність та працездатність конструкції.

Секція акумуляції складається з ємнісних теплових акумуляторів оптимізованої конструкції в якій застосовано три робочих тіла. Практичну і наукову значимість оптимізованої конструкції підтверджено патентом на винахід України.

В оптимізованій конструкції ємнісних теплових акумуляторів застосовуються окрім води, дві теплоакумулюючі речовини – нова створена композиція теплоакумулюючої рідини та підібраний природній матеріал з фазовим переходом. Їх сумісне застосування дозволяє синергетично підвищити теплову акумуляцію і подолати тепловому стратифікацію в акумулюючій ємності.

За результатами комплексних досліджень створено і використано нову вибухо- і пожежобезпечну композицію теплоакumuлюючої рідини та вибрано матеріал з фазовим переходом «плавлення - затвердіння», що дозволило підвищити теплове акумулювання в ємності теплового акумулятора.

За результатами досліджень теплофізичних і технічних параметрів композиції теплоакumuлюючої рідини встановлено строк її експлуатації – не менше 2 - 4 років.

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.

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.

Зауваження та недоліки дисертаційної роботи.

1. До Розділу 2. Огляд методів математичного моделювання, є наступні зауваження:

2.1. Метод симетрій

- Рівняння 2.1.3. коректно записується у формі:

$$\sum_{i=1}^m \xi_i \frac{\partial \phi}{\partial x_i} + \sum_{\gamma=1}^n \varphi^\gamma \frac{\partial \phi}{\partial f^\gamma} = 0$$

- В рівнянні 2.1.4. допущено описку, правильний запис $\phi^\gamma = I^\gamma(x_i^{par}, f^\gamma)$, оскільки ϕ^γ – інваріант (автомодельна функція), вона не повинна залежати від f^γ , інакше це не інваріант, а довільна функція. I^γ – інваріант у просторі (x, f) – геометричний інваріант групи Лі. ϕ^γ – автомодельна функція

Дані співвідношення визначають інваріанти інфінітезимального перетворення і після їх інверсії дозволяють отримати подання залежних змінних f^γ через автомодельні змінні η . З урахуванням того, що автомодельні функції ϕ^γ залежать лише від автомодельних змінних η , маємо рівнянні 2.1.5. і далі по тексту.

- Залежність 2.1.18 скоріше має виглядати так: $q(\sigma) = 0$.

- Описка в рядку над рівнянням 2.1.19. Має бути «Тоді друге рівняння (2.1.17) трансформується на рівняння:».

2.2. Метод ґраток Больцмана

Не точний вираз «Форма комірок ґрат може бути обрана довільно..», точніше: «Форма комірок ґрат може обиратися різною, однак має задовольняти вимоги ізоτροпії...»

2.3. Метод молекулярної динаміки

- У виразі (2.3.1) доцільно уточнити залежність сили, що діє на i -ту частинку. Для системи взаємодіючих частинок сила визначається координатами всіх частинок системи, а не лише радіус-вектором r_i . З урахуванням цього, вираз (2.3.1) записується у вигляді:

$$m_i \cdot a_i(t) = F_i(r_1(t), r_2(t), \dots, r_N(t)) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2.3.1)$$

у виразі (2.3.1.) величини $a_i(t), F_i, r_i(t)$ – векторні.

2.4. Метод дисипативних часток

- у тексті зазначено, що маси всіх частинок обрано однаковими та рівними приведений одиниці маси $m_i = m \equiv 1$. Однак у рівняннях (2.4.1) це припущення явно

не зафіксовано, внаслідок чого друге рівняння формально не має вигляду другого закону Ньютона. Доцільно записати рівняння руху у вигляді: $m_i \cdot \frac{dr_i}{dt} = F_i$ та прямо зазначити, що використано приведені одиниці, в яких $m_i = 1$.

- в рівнянні 2.4.2. описка « $j \neq 1$ », коректний запис $j \neq i$.

2. До Розділу 3. Моделювання тепломасообмінних та гідродинамічних процесів мобільного теплового акумулювання

- використовується термін «теплоємність» для опису процесів, в яких відбуваються фазові переходи. Теплоємність за визначенням - фізична величина, що характеризує здатність тіла акумулювати теплову енергію при зміні температури, вона визначається для однофазного стану і не включає теплоту фазового переходу, визначається як:

$$c = \frac{1}{m} \cdot \frac{dQ}{dT}$$

Необхідно або використовувати коректний термін – ефективна теплоємність, або обумовити, щоб під терміном «теплоємність» мається на увазі саме «ефективна теплоємність».

Ефективна теплоємність – узагальнена величина, яка визначається як сума теплоти фазового переходу та теплоти, що накопичується за рахунок теплоємності. Тоді залежність можна представити у вигляді

$$c_{eff} = c + \frac{dL}{dT}$$

де L - питома теплота фазового переходу.

- 3.3.1. Осцилюючий потік у пласкому каналі

У визначеннях після (3.3.1) є помилка розмірності: написано « ρ - густина рідини, m^3/c ». Для густини має бути kg/m^3 .

3. До Розділу 7. Дослідження акумуляції теплової енергії створеного дослідного зразка мобільного теплового акумулятора. Дискретна система опалення.

В описі до рис.7.3.2 вказано: «Температура T_1 гарячого теплоносія подається в акумуляційну секцію від джерела нагріву до моменту співпадіння з температурою

T2. Холодний теплоносій T2 рухається від акумуляційної секції до джерела нагріву» на рисунку представлено іншу картину – T1 має менше значення ніж T2.

4. Дослідження термоцикування проведено за фіксованих температурних умов. Результати, відображені в розділі 6, підтверджують високі експлуатаційні показники вибраного матеріалу. При цьому на графіках заряд-розряд (рис.7.3.1.) температура гарячого теплоносія виходить за межі опрацьованих режимів. В роботі корисно було б провести відповідні дослідження, або вказати експлуатаційні обмеження.

5. Зауваження щодо оформлення роботи. В текстах дисертаційної роботи та реферату є граматичні помилки та неточності. Описки, помилки типу «споживчів» (с.35), «не подалік», «речованами», «законодовчах баз», «задаєю» (с. 36) і т.п зрозумілі, мають обов'язково виправлятися і не погіршувати враження від дійсно потужної наукової праці.

Загальні висновки.

Подана до захисту дисертаційна робота Коник Аліни Василівни «Теплофізичні основи систем дискретного опалення з застосуванням теплових акумуляторів ємнісного типу» за своєю актуальністю, важливістю поставлених задач, рівнем реалізації, **містить обґрунтовані висновки на основі одержаних здобувачем достовірних результатів є закінченим науковим дослідженням і характеризується єдністю змісту.** Роботу виконано відповідно до наукових програм і планів Інституту технічної теплофізик НАН України.

Зазначені у відгуку зауваження не знижують загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи. Здобувачем отримано нові наукові результати, які вирішують важливу науково-практичну задачу питань акумулювання теплової енергії та транспортування її мобільним способом за рахунок застосування створеної автором теплоакумлюючої рідини в ємнісних теплових акумуляторах оригінальної конструкції. В результаті застосування трьох робочих тіл в

акумуючій ємності, серед яких матеріал з фазовим переходом першого роду та теплоакуюча рідина, отримано синергетичний ефект, що позитивно впливає на теплообмін в процесі акумуляції. Це дає можливість створювати нове обладнання для транспортування теплової енергії мобільним способом.

Основні положення дисертаційної роботи висвітлено у наукових публікаціях здобувача та апробовано на наукових конференціях. Зміст реферату повністю відповідає основним положенням дисертаційної роботи. Реферат та дисертаційна робота відповідають чинним вимогам.

На підставі вищезазначеного вважаю, що за актуальністю теми, ступенем обґрунтованості наукових положень, висновків, теоретичною та практичною цінністю результатів дисертаційна робота «Теплофізичні основи систем дискретного опалення з застосуванням теплових акумуляторів ємнісного типу» повністю 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 автор Коник Аліна Василівна, заслуговує на присудження їй наукового ступеня доктора технічних наук за вказаною спеціальністю.

**Доктор технічних наук,
завідувач відділом технологій
альтернативних палив
Інститут газу НАН України**



Костянтин П'ЯНИХ

"Підпис П'яних К.Є. засвідчую"

Начальник відділу кадрів
Інституту газу НАН України

"29" 01 2026р.



Марек О.Б.