

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
КОРІНЧЕВСЬКОЇ ТЕТЯНИ ВОЛОДИМИРІВНИ

«Теплофізичні властивості теплоакумулюючих матеріалів з фазовим переходом на основі органічних сполук», що подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

I. Загальна характеристика роботи

Актуальність теми дисертації та зв'язок її з науковими програмами та планами. Пріоритетними завданнями для енергетики України на сьогоднішній день є зниження рівня енергоємності виробництва, підвищення енергоефективності систем з вироблення теплової та електричної енергії, заміщення природного газу іншими видами енергоресурсів, у тому числі отриманими з альтернативних джерел енергії, а також підвищення ефективності використання теплової енергії споживачами. Перспективним напрямом підвищення ефективності використання теплової енергії у споживачів є використання електротеплових акумуляторів у якості систем електротеплоакумуляційного опалення. Важливою умовою для впровадження подібних систем, яка регламентована ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування», є споживання електроенергії по багатозонним лічильникам в період мінімального навантаження енергосистеми (нічний час), коли діють понижуючі тарифні коефіцієнти. Широке використання електротеплових акумуляторів дозволить уникнути "нічних провалів" у споживанні електроенергії та зменшити перевитрати палива на електростанціях, які пов'язані з переведенням електрогенераторів в режими, відмінні від номінальних.

Одним з перспективних способів акумулювання теплової енергії на даний час є акумулювання теплоти за рахунок явища фазового переходу при плавленні – кристалізації теплоакумулюючого матеріалу (ТАМ). Використання теплоти плавлення для акумулювання забезпечує високу щільність накопиченої енергії при невеликих перепадах температур ТАМ та достатньо стабільну температуру теплоносія на виході з теплового акумулятора.

Актуальним напрямом наукових досліджень є дослідження ТАМ з фазовим переходом на основі органічних сполук. Використання органічних сполук у якості ТАМ забезпечує доволі високу щільність накопиченої енергії, характеризується хімічною та термічною стійкістю, а також органічні сполуки не є корозійноактивними в порівнянні з неорганічними сполуками, наприклад, з кристалогідратами. Але є фактори, які стримують широке впровадження теплових акумуляторів з фазовим переходом на основі органічних сполук, наприклад, на основі парафіну: досить низький коефіцієнт теплопровідності, що вимагає збільшення поверхні теплообміну



теплоносія системи тепlopостачання і ТАМ або використання додаткових матеріалів з високим коефіцієнтом теплопровідності, а також вартість ТАМ.

Для більш широкого впровадження даних теплових акумуляторів необхідне проведення як теоретичних, так і експериментальних досліджень теплових процесів, які протікають в ТАМ на основі органічних сполук при плавленні (режим заряду) та кристалізації (режим розряду), теплофізичних властивостей цих ТАМ з метою вибору більш дешевих ТАМ на основі органічних сполук, що і являє собою поставлену мету дисертаційної роботи.

Автор формулює мету дослідження наступним чином: «Дослідження теплофізичних властивостей матеріалів з фазовим переходом на основі органічних сполук з метою використання як робочих тіл теплових акумуляторів». Поставлені задачі дослідження є чіткими, зрозумілими та відповідають отриманим науковим та практичним результатам дисертаційної роботи.

Зважаючи на вищевикладене, актуальність дисертаційної роботи не підлягає сумнівам.

Актуальність та значимість отриманих результатів дисертаційної роботи також підтверджується тим, що вона була виконана в рамках державної науково-дослідної роботи згідно програми НАН України за темою «Дослідження тепломасопереносу в термохімічних і сорбційних процесах та створення теоретичних засад для розробки теплових насосів і акумуляторів теплоти» 2007-2011 рр. (№ ДР 0107U002128).

Ступінь обґрунтованості та достовірність наукових положень та висновків базується на виконаному аналізі літературних джерел за темою дослідження, грамотному плануванню та постановці експериментальних досліджень, коректному завданні початкових та граничних умов при моделюванні теплообмінних процесів у теплоакумуючому елементі. Достовірність результатів наукових досліджень ґрунтується на фундаментальних положеннях теплообміну при фазовому переході (задача Стефана), нестационарної теплопровідності та теплообміну при природній конвекції. Також достовірність отриманих результатів підтверджується непоганою збіжністю результатів теоретичних та експериментальних досліджень в межах інженерної похибки (5%).

Автор сформулював **наукову новизну роботи** наступним чином:

- вперше запропоновано для використання в системах акумуляції теплоти матеріали з фазовим переходом – суміші на основі парафіну, буровугільного та поліетиленового воску, що використовуються в ливарному виробництві;

- вперше визначено температури та питому теплоту фазових переходів до та після багатократного нагрівання та охолодження сумішей на основі парафіну, буровугільного та поліетиленового воску, в результаті чого відібрано для використання, як теплоакумуючого матеріалу, суміш 85% парафіну та 15% буровугільного воску, що має найкращі теплофізичні властивості;

- вперше для твердого та рідкого стану теплоакумулюючого матеріалу було отримано температурну залежність питомої теплоємності та коефіцієнта теплопровідності;

- вперше досліджено вплив складу сумішей на основі парафіну, буровугільного та поліетиленового воску на температуру початку термічного розкладання.

В цілому, отримані автором результати є новим науковим знанням у галузі технічної теплофізики та промислової теплоенергетики, зокрема стосовно дослідження теплофізичних та фізико-хімічних властивостей органічних сполук на основі парафіну у якості теплоакумулюючого матеріалу, а також визначення їх теплових характеристик.

Практична значимість отриманих результатів полягає у тому, що отримані дані щодо інтервалів температур плавлення та кристалізації ТАМ, питомої теплоти фазового переходу, температури початку термічного розкладання, залежностей коефіцієнтів теплоємності та теплопровідності від температури для твердого та рідкого стану теплоакумулюючих сумішей, зміни температури ТАМ при нагріванні теплоносія в тепловому акумуляторі з теплоакумулюючою сумішшю на основі парафіну та буровугільного воску у подальшому можуть бути використані при інженерних розрахунках та конструюванні електротеплових акумуляторів. Також практичну значимість роботи підтверджує той факт, що здобувачем на основі математичної моделі теплообмінних процесів в ТАМ та інженерного методу визначення ентальпії фазового переходу теплоакумулюючого матеріалу було розроблено програмне забезпечення «Т-History» на мові програмування Delphi для обробки експериментальних даних та представлення їх у графічному вигляді, а також для розрахунку ентальпії фазового переходу з похибкою в межах 10%. Здобувачем на підставі результатів теоретичних та експериментальних досліджень була запропонована конструкція теплового акумулятора капсульного типу з теплоакумулюючою сумішшю на основі парафіну, а також було проведено конструктивний і тепловий розрахунок запропонованої конструкції теплового акумулятора, який також можливо використовувати для інженерних розрахунків подібних електротеплоаккумуляторів.

Отримані наукові результати дисертаційної роботи використовуються у ТОВ "Інноваційно-технологічна група", що підтверджується відповідним актом впровадження. Також практичне значення дисертації підтверджується одержаними патентами України на електричний термоаккумулятор та конвективну теплонасосну сушильну установку із замкнутим контуром циркуляції сушильного агента (патенти приведені у додатках дисертації).

Повнота викладення результатів дисертаційної роботи. Основний зміст дисертаційної роботи та її положення достатньо повно викладені в 26 наукових працях, з них 8 – статті у наукових фахових виданнях, рекомендованих МОН України, 1 стаття в іноземному журналі, який входить до списку міжнародних наукометричних баз даних, 15 – у вигляді тез доповідей на науково-технічних конференціях, 1 патент на винахід та

І патент на корисну модель. Рівень, кількість публікацій та апробації матеріалів дисертації повністю відповідає існуючим вимогам, що їх пред'являють до дисертацій. Автореферат повністю відображає основні положення, наукові та практичні результати дисертаційної роботи, що одержані здобувачем.

Зміст, структура та обсяг роботи.

У першому розділі автором був зроблений аналітичний огляд існуючий методів акумулювання теплоти. Показана перспективність методу акумулювання теплоти за рахунок теплоти фазового переходу ТАМ. Проведений аналіз ТАМ з фазовим переходом на основі кристалогідратів неорганічних солей та органічних сполук. Наведені теплові, фізико-хімічні, кінетичні, економічні та екологічні критерії вибору ТАМ з фазовим переходом. Розглянуто різні галузі застосування ТАМ – у будівництві, автомобільній промисловості, сільському господарстві, системах вентиляції будівель, а також для систем опалення та гарячого водопостачання. Розглянуто теоретичні основи процесу теплообміну при фазових переходах, зокрема класичну задачу Стефана, яка застосовується для моделювання фазових переходів тверде тіло-рідина. Зроблено висновок про перспективність засування сумішей на основі парафіну та буровугільного воску для систем акумулювання теплоти, які використовуються у ливарному виробництві. Автором були сформульовані мета, завдання та напрямок експериментальних та теоретичних досліджень його дисертаційної роботи.

У другому розділі наведено опис приладів, які використовувалися в експериментальних дослідженнях для визначення теплоти фазового переходу, інтервалу температур плавлення-кристалізації, теплоємності (мікрокалориметр ДСМ-2М), термостійкості (дериватограф Q-1000) та теплопровідності (ІТ-7-60НМ) та методів експериментальних досліджень: диференціальна сканувальна калориметрія – для визначення температури, питомої теплоти фазових переходів та питомої теплоємності; дериватографічний метод – для визначення термостійкості; визначення теплопровідності ТАМ проводилось контактним стаціонарним методом плоскої пластини. Також автором була проведена статистична оцінка похибок отриманих експериментальних даних.

У третьому розділі автор представив результати експериментальних досліджень теплофізичних та фізико-хімічних властивостей 5-ти зразків теплоакумулюючих сумішей на основі парафіну з різним відсотковим співвідношенням парафіну, буровугільного та поліетиленового воску. Отримані залежності теплоємності та теплопровідності теплоакумулюючих сумішей на основі парафіну, а також окремо для парафіну і буровугільного воску, які автор представив у графічній формі.

Автором було визначено, що найбільш ефективною для акумулювання теплоти є суміш № 2, що містить 85% парафіну та 15% буровугільного воску, яка має найбільшу питому теплоту фазових переходів ($\Delta H_{\text{пл}} = 174,1$ кДж/кг; $-\Delta H_{\text{кр}} = 164,4$ кДж/кг) в інтервалах температур $T_{\text{пл}} = 28...86$ °С та $T_{\text{кр}} = 73,0...26,5$ °С. Але автор також відмічає, що у

запропонованого ТАМ досить низька теплопровідність, що значно знижує його ефективність при використанні в системах акумулювання теплоти. Пропонується даний недолік усунути за рахунок додавання матеріалів з високою теплопровідністю або шляхом збільшення поверхні теплообміну теплоносія і ТАМ в тепловому акумуляторі. Також виявлено, що багаторазове циклічне нагрівання та охолодження (термоциклювання) досліджуваних теплоакумулюючих сумішей, які містять парафін і буровугільний віск, призводить до зміщення максимумів піків плавлення та кристалізації в область більш високих температур, збільшення питомої теплоти фазових переходів, а також не викликає розшарування всіх досліджених матеріалів. Здобувачем на основі інженерного методу визначення ентальпії фазового переходу теплоакумулюючого матеріалу було розроблено програмне забезпечення «Т-History» на мові програмування Delphi для обробки експериментальних даних та представлення їх у графічному вигляді, а також для розрахунку ентальпії фазового переходу.

У *четвертому розділі* автором були проведені експериментальні дослідження процесу теплообміну з урахуванням фазового переходу ТАМ на прикладі капсульного теплоакумулюючого елемента. В результаті отримано розподіл температур під час нагрівання та охолодження ТАМ з фазовим переходом при різних швидкостях нагрівання ТАМ: 0,3; 0,5; 0,7; 1,2 К/хв. Також було проведене математичне моделювання теплообміну при нагріві та охолодженні ТАМ з фазовим переходом з використанням програмного комплексу COMSOL Multiphysics 4.4. Автором запропонована двовимірною математичною моделлю теплоакумулюючого елемента у металевій капсулі з заданими початковими та межовими умовами III роду. Отримані результати теоретичних та експериментальних досліджень виявили, що при нагріванні ТАМ не має потреби використовувати високу швидкість нагрівання, потужність нагрівача потрібно підбирати таким чином, щоб температура ТАМ та теплоносія були близькими в кінці процесу нагрівання. Також отримані результати підтвердили, що при використанні невеликих об'ємів капсул при теоретичних дослідженнях конвективною складовою в рівнянні теплопровідності можна знехтувати. Автор зробив порівняльний аналіз розподілу температур ТАМ в процесі нагріву та охолодження, отриманих в результаті теоретичних та експериментальних досліджень, та показав, що розбіжність між цими результатами складає не більше 5%.

У *п'ятому розділі* автор наводить розрахунки економічної ефективності та доцільності використання електротеплоакумуляційних систем опалення. Приведена схема конструкції експериментального зразка електричного теплоакумулятора з органічним ТАМ на основі парафіну та буровугільного воску. Конструкція теплового блоку має розвинуту теплообмінну поверхню, що покращує теплообмін в тепловому акумуляторі. Коефіцієнт теплопровідності теплоакумулюючого елемента підвищено шляхом розміщення ТАМ в металеву оболонку, яка має високу теплопровідність. На прикладі конструкції експериментального зразка теплового акумулятора був проведений його конструктивний та тепловий

рзрахунок. Зроблено висновок про те, що регулюючи кількість ТАМ, можна підібрати необхідну теплову ємність апарату, яка забезпечить необхідний час розряду теплового акумулятора. Також автором було запропоновано вдосконалити конвективну теплонасосну сушильну установку із замкнутим контуром циркуляції сушильного агента для зневоднення термолабільної сировини шляхом обладнання кожного піддона плоским контейнером, заповненим ТАМ з фазовим переходом, що забезпечить сталість температури сушіння протягом усього періоду роботи теплового насоса.

У *додатках* наведені креслення та специфікація розробленої конструкції електротеплового акумулятора з органічним ТАМ на основі парафіну та буровугільного воску та патенти на винахід «Електричний термоакумулятор» та на корисну модель «Конвективна теплонасосна сушильна установка із замкнутим контуром циркуляції сушильного агента».

Дисертаційна робота є структурованою і характеризується послідовністю викладання матеріалу та взаємозв'язком між її розділами. Текст дисертації добре ілюстровано графічним матеріалом. Дисертація складається зі вступу, переліку умовних позначень, 5-ти розділів, висновків, списку використаних джерел (202 найменування) та 4-х додатків. Дисертація викладена на 211 сторінках, з них 132 сторінок основного тексту, містить 65 рисунків та 19 таблиць. Структура та обсяг дисертаційної роботи повністю відповідають вимогам, що їх пред'являють до дисертацій, а її зміст – паспорту спеціальності 05.14.06.

II. Зауваження щодо змісту дисертаційної роботи

1. Графіки на рис. 4.2 і рис. 4.4 практично дублюють один одного. Можливо було краще залишити лише графік 4.4.

2. У 3 розділі пункті 3.2 на графіках 3.1-3.5, де зображені ДСК-криві нагрівання та охолодження зразків ТАМ, було б доцільніше позначити вісь x як час впродовж якого змінюється температура ТАМ та додати на ці графіки другу вісь y зі значеннями температури ТАМ або ж замінити вісь y зі значеннями напруги на значення температури ТАМ.

3. У табл. 2 автореферату (стр. 7) помилково занесені у колонку зі значеннями інтервалу кристалізації після термоцилювання (ТЦ) значення інтервалів температур плавлення до ТЦ. У дисертації наведені правильні значення (табл. 3.2 пункт 3.2).

4. На чому ґрунтується припущення про можливість використання у математичній моделі теплообмінних процесів теплоакуючого елементу рівняння теплопровідності у двовимірній постановці, а не у тривимірній, а також незрозуміло чому нехтуються теплові втрати в навколишнє середовище від ТАМ? В реальних умовах теплообміну теплові втрати теплового акумулятора мають велике значення.

5. Було б доцільно показати у 4 розділі дисертації як змінюється кількість акумульованої теплоти в процесі заряду теплового акумулятора та як змінюється віддача теплоти в процесі розряду. Також у 4 розділі можливо

було розрахувати темп нагріву та охолодження ТАМ використавши першу теорему Кондратьєва (регулярний тепловий режим).

6. У пункті 2.5 була проведена лише статистична оцінка похибки отриманих експериментальних даних та не було враховано інструментальну похибку вимірювального комплексу, який складається з первинних (термометри опори чи термопари) та вторинного перетворювачів температур (вимірювальний прилад). Врахувавши інструментальну похибку сумарне значення похибок вимірювання теплоти фазових переходів, інтервалів температур плавлення та кристалізації, теплоємності та термостійкості ТАМ було більш реалістичне ніж 1-3%, котрі приведені здобувачем.

7. Застосовувати фразу у практичному значенні результатів дисертації «оптимальний режим нагріву» слід більш виважено тому що це тягне за собою вибір методу оптимізації та критеріїв оптимізації чого в роботі проведено не було. Доцільніше, у цьому випадку, використовувати фразу «раціональний режим нагріву».

8. Загальні висновки в дисертації носять здебільшого декларативний характер. В них не в повній мірі розкрита сутність проведених досліджень, а лише констатуються отримані теоретичні та практичні результати.

9. Обраний варіант теплоакумуючої органічної суміші № 2 на основі парафіну 85% та 15% буровугільного воску, по твердженню автора, є більш дешевим, ніж парафін у чистому вигляді (без домішок). Але отримані значення теплоємності, питомої теплоти фазового переходу та теплопровідності є нижчими за аналогічні значення для парафіну у чистому вигляді, тобто отримано тільки економічний ефект, при цьому теплоакумуюча ефективність обраної суміші буде меншою, ніж у парафіну навіть при використанні металевих капсул.

III. Загальні висновки по роботі

В цілому, зроблені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Корінчевської Т.В., яка виконана на достатньо високому науковому рівні, безсумнівно є актуальною та має значну практичну цінність. Новизна роботи, обґрунтованість наукових положень та висновків, в цілому, не викликає сумнівів.

Дисертаційна робота здобувача Корінчевської Тетяни Володимирівни носить прикладний характер та являє собою закінчену науково-дослідну роботу, в якій на основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень теплофізичних властивостей органічних сумішей на основі парафіну було запропоновано їх використання у якості теплоакумуючих матеріалів. Були визначені теплофізичні, фізико-хімічні властивості і досліджені процеси теплообміну при нагріванні та охолодженні теплоакумуючих сумішей на основі парафіну. Було обрано варіант суміші зі складом 85% парафіну та 15% буровугільного воску, яка має найвищу питому теплоту фазового переходу. Здобувачем отримані температурні залежності питомої теплоємності та коефіцієнта теплопровідності для

твердого та рідкого стану теплоакумулюючого матеріалу. Встановлено, що після 500 - 600 циклів плавлення-кристалізації спостерігається збільшення значення питомої теплоти фазових переходів сумішей на основі органічних сполук та відсутній негативний вплив на інтервали температур плавлення і кристалізації. Була розроблена та захищена патентом України конструкція електричного теплового акумулятора капсульного типу. Для експериментального зразка були визначені теплові характеристики в режимах заряду та розряду. Також була вдосконалена технологічна схема сушіння конвективної теплонасосної сушильної установки із замкнутим контуром циркуляції сушильного агента з застосуванням теплоакумулюючих органічних сумішей на основі парафіну, яка також була запатентована.

На підставі викладеного вище вважаю, що дисертація Корінчевської Тетяни Володимирівни «Теплофізичні властивості теплоакумулюючих матеріалів з фазовим переходом на основі органічних сполук» на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика за рівнем наукової новизни, практичного значення отриманих результатів та повноти висвітлення у наукових виданнях відповідає вимогам пунктів 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затверджено Кабінетом Міністрів України 24 липня 2013 р. № 567 (зі змінами), щодо кандидатських дисертацій, а здобувач Корінчевська Тетяна Володимирівна заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Офіційний опонент

канд. техн. наук, науковий співробітник відділу геотермальної енергетики Інституту відновлюваної енергетики НАН України



О.В. Хіменко

Підпис к.т.н. Хіменка О.В. засвідчую.

Вчений секретар Інституту відновлюваної енергетики НАН України, канд. техн. наук



Т.В. Суржик