

Вплив присутності металевого волокна на швидкість зарядки та розрядки термоакумулювального матеріалу з фазовим переходом

О. Я. Хлієва, В. П. Желєзний, О. А. Паскаль, Я. О. Глек, Д. О. Івченко

Термоакумулювання енергії грає важливу роль в сонячних енергетичних системах. Застосування термоакумулювального матеріалу з фазовим переходом та підбір добавок для підвищення швидкості акумулювання теплоти є перспективним напрямком збільшення ефективності та надійності таких систем.

Об'єктами дослідження були технічний парафін та композитні термоакумулювальні матеріали на його основі, армовані алюмінієвим та мідним волокном діаметром 30 та 45 мкм, відповідно.

Створено експериментальну установку з циліндричною вимірювальною коміркою, яка розглядалася як модель капсули з термоакумулювальним матеріалом. Проведено експериментальне вимірювання швидкості зміни температури в чистому парафіні та зразках композитних термоакумулювальних матеріалів. Досліджувалися два режими нагріву та охолодження зразків: від 48 до 59 °С (режим с фазовим переходом) та від 30 до 40 °С (режим без фазового переходу).

Час нагріву від 48 до 59 °С склав 13 хв. для зразку парафіну, 11 й 10,5 хв. для зразків парафіну зі вмістом 0,00588 й 0,01780 м³·м⁻³ алюмінієвого волокна, відповідно, та 11 й 8 хв. для зразків парафіну зі вмістом 0,00524 й 0,01380 м³·м⁻³ мідного волокна, відповідно. Найменший час нагріву від 30 до 40 °С склав 6 хв. для зразка парафіну зі вмістом 0,01380 м³·м⁻³ мідного волокна у порівнянні з 9 хв. для зразка чистого арафіну.

Підтверджено доцільність застосування мідного волокна як добавки до термоакумулювального матеріалу парафіну для підвищення швидкості зарядки та розрядки термоаккумуляторів без їх істотного дорожчання. Присутність металевого волокна в розплавленому парафіні пригнічує підйомно-спадні конвективні токи, тому основним механізмом передачі теплоти стає теплопровідність. Цей факт сприятиме більш швидкому вирівнюванню температурного поля по висоті термоакумулювальних капсул.

Ключові слова: термоакумулювальний матеріал з фазовим переходом, парафін, металеве волокно, швидкість нагріву та охолодження, теплопровідність.

1. Вступ

Термоакумулювання енергії грає важливу роль в сонячних енергетичних системах. Впровадження систем накопичення теплової енергії може подолати невідповідність у часі між надходженням сонячної енергії та споживанням теплової. Акумулювання прихованої теплоти з використанням матеріалу з фазовим переходом широко відомо як ефективний спосіб зберігання теплової енергії. Основ-

ними перевагами таких матеріалів є висока густина акумулювання енергії та ізотермічність процесів під час їх затвердіння і плавлення (зарядки та розрядки) [1].

Парафін – привабливий матеріал для акумулювання тепла [2]. Парафіни дешеві, екологічно нешкідливі і нетоксичні. Цим термоакумулювальним матеріалам з фазовим переходом (ТАМФП) притаманні здатність акумулювати приховану велику кількість теплоти у вузькому діапазоні температур, відсутність корозійного впливу на основні конструкційні матеріали системи акумулювання тепла, але низька теплопровідність.

Дослідження багатьох науковців спрямовані на усунення даного недоліку та концентруються на пошуку шляхів підвищення теплопровідності існуючих ТАМФП. Розглядається декілька підходів: встановлення металевих ребер у конструкції термоаккумулятора [3] або у капсули з ТАМФП [4], додавання у ТАМФП наночасток [5], у тому числі наночасток оксидів металів [6], вуглецевих нанотрубок та нановолокон [7–9], введення ТАМФП в високотеплопровідну структуру з розширеного графіту [9] або металеву матрицю [10], додавання високотеплопровідних металевих волокон [3, 11, 12], тощо. Таким чином, проведення досліджень, спрямованих на підвищення теплопровідності ТАМФП, є в даний час актуальними. Відомо, що збільшення теплопровідності ТАМФП сприятиме збільшенню швидкості реакції системи на теплові впливи й, тим самим, збільшенню загальної ефективності термоакумулювальних систем [10].

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Вирішити завдання підвищення швидкості зарядки і розрядки термоаккумулятора з ТАМФП можна двома методами. Перший з них спрямований на збільшення теплообмінної поверхні термоаккумуляторів за рахунок використання ребрення [3]. Крім того, ребра можна встановлювати й в капсули з термоакумулюючою речовиною [4].

В роботі [3] було проведено експериментальне дослідження з подальшим порівнянням двох методів покращення теплопередачі в термоакумулювальних системах з використанням прихованої теплоти матеріалу: встановлення алюмінієвих ребер в аккумуляторі або укладання металевого волокна з низькосортної вуглецевої сталі. В якості ТАМФП розглядався н-октадекан. Результати досліджень показали, що розглянуте металеве волокно не може конкурувати з алюмінієвими ребрами. Однак було показано, що використання металевого волокна є дешевим рішенням, яке може прискорити процес зарядки за рахунок покращення прискорення передачі тепла на 14 % у порівнянні з системою без використання ребер або металевого волокна. Але в роботі не було проведено дослідження застосування металевого волокна з високою теплопровідністю (мідного або алюмінієвого).

У дослідженні [4] ребра використовувалися для покращення швидкості теплопередачі в капсулах з ТАМФП. Результати показують, що застосування ребер прямої конструкції сприяють більш суттєвому підвищенню коефіцієнта теплопередачі, ніж інші конструкції, особливо коли кількість ребер невелика (до 6 штук) та теплопровідність матеріалу капсули низька. Але конструкція капсул з ребрами досить складна, тому дорога.

Застосування ребер – це добре відомий метод інтенсифікації переносу теплоти, але основними недоліками такого підходу є високі вартість і металоемність. Крім того, наявність металевих ребер сприяє зменшенню маси ТАМФП в термоакумуляторі та, як наслідок, його енергоемності.

Другий підхід спрямований на збільшення теплопровідності базового ТАМФП за рахунок добавки різних високо теплопровідних структур. Розглянемо більш детально можливі варіанти реалізації цього підходу.

В роботі [6] були досліджені термічні властивості ТАМФП на основі парафіну зі вмістом невеликої кількості наночасток CuO або Al_2O_3 (1,0 % мас.). Було зафіксоване підвищення теплопровідності парафіну при додаванні до нього наночасток CuO на 60,6 %, що на 21,1 % вище, ніж це значення для парафіну зі вмістом Al_2O_3 . Як для ТАМФП парафін/ CuO , так й для парафін/ Al_2O_3 спостерігалось зменшення переохолодження в порівнянні з чистим парафіном. Крім того було зафіксоване зниження прихованої теплоти плавлення та кристалізації на 4,3 % й 5,9 %, відповідно, при додаванні до парафіну наночасток CuO , та на 2,2 % й 3,7 %, відповідно, при додаванні наночасток Al_2O_3 . Слід зазначити, що зниження теплоємності і вплив на зміну теплоти плавлення в присутність наночасток в речовинах в рідкому та твердому стані відзначається в ряді роботи [13, 14]. Такі зміни є негативним фактором для наноструктурованих речовин, перспективних як ТАМФП.

У дослідженні [7] показано, що додавання вуглецевих нанотрубок (1 мас. %) до композитного ТАМФП, що містить н-ейкозан (парафін) у порах розширеного перліту (40 мас. %) сприяє покращенню теплопровідності у порівнянні з зазначеним ТАМФП без нанотрубок. Причому впливу на сумісність компонентів та зміни термічної стабільності не спостерігалось. Але наявність перліту, що виконує роль каркаса для утримання парафіну в порах, сприятиме зниженню теплоти фазового переходу композитної ТАМФП, що є небажаним ефектом. При цьому композит нанотрубки/парафін без каркасу відрізняється низькою стійкістю: як добре відомо, велике відношення довжини до діаметру і велика поверхнева енергія змушують вуглецеві нанотрубки легко об'єднуватися друг з другом у ТАМФП [8]. Отже, для подальшого застосування в промисловості необхідно проводити модифікацію вуглецевих нанотрубок для покращення їх дисперсного розподілу в ТАМФП та теплопровідності отриманого композитного матеріалу [8].

3D матеріали на основі вуглецю (вуглецева піна та розширений графіт) мають об'ємну сітчасту структуру з великою площею поверхні контакту матеріалу з ТАМФП, що сприяє збільшенню теплопровідності композитного ТАМФП [8]. У дослідженні [9] чотири вуглецевих матеріали (деревинне вугілля, активоване вугілля, вуглецеві нанотрубки і розширений графіт) були використані для виготовлення композитних ТАМФП на основі гептадекану (парафіну). Метод вакуумного насичення застосовувався для заповнення пор вказаних вуглецевих матеріалів. Серед розглянутих вуглецевих матеріалів розширений графіт мав найбільший вміст ТАМФП – 94,5 %. Композитний матеріал на основі розширеного графіту показав найвищу приховану теплоту плавлення ($195,9 \text{ Дж} \cdot \text{г}^{-1}$).

Однак застосування в промисловості композитних ТАМФП на основі вуглецю все ще незначне з причин їх високої вартості та зниження механічних властивостей [8].

В роботі [10] новий тип пористих матеріалів – металевий ієрархічний 3D макро-нанопористий матеріал – був досліджений з метою стабілізації форми і підвищення теплопровідності ТАМФП. Через наявність макропор в металі (міді) повнота заповнення пор ТАМФП (парафіном) складала приблизно 90 об. %. Було показано [10], що використання макро-нанопористої металевої структури призводить до збільшення теплопровідності композитного ТАМФП в три рази в порівнянні з чистим ТАМФП. Але макро-нанопористі метали на сьогодні дороги, тому необхідно вивчити можливість застосування більш дешевих, але не менш ефективних добавок до ТАМФП.

У статті [11] показано, що металеву вату можна використовувати в якості недорогої добавки для збільшення теплопровідності ТАМФП. Було показано, що для досягнення підвищення ефективної теплопровідності композитного ТАМФП з металевою ватою (епоксидна смола у кількості 90 об. % та нержавіюча сталь) доцільно виконувати вакуумування при створенні матеріалу. Отриманий композитний ТАМФП має анізотропну ефективну теплопровідність, аналогічну графітовим композитам. Виміряна ефективна теплопровідність композитного ТАМФП становить $4,34 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, тоді як теплопровідність епоксидної смоли низька, зазвичай близько $0,2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$. Але недоліком дослідження є те, що як ТАМФП не розглядався технічний парафін та використовувався лише один від металевого волокна з однією об'ємною часткою.

У роботі [12] було виконане дослідження чотирьох методів відведення тепла від літій-іонних акумуляторів при різних токах розряду: природне повітряне охолодження; відведення теплоти чистим парафіном; композитом мідна піна/парафін та композитом мідне волокно/парафін. Результат аналізу чотирьох зразків композитних ТАМФП з пористістю від 83,7 до 96,1 % показав, що застосування спеченого каркасу з мідних волокон пористістю 90 % забезпечує найкращі характеристики композитного матеріалу. Композитний ТАМФП мідне волокно/парафін може ефективно поглинати тепло, яке виділяється при роботі акумулятора, що знижує температуру акумулятора приблизно на $2 \text{ }^\circ\text{C}$ в порівнянні з чистим парафіном. Але в дослідженні не розглядався варіант використання більш дешевого алюмінієвого волокна.

Через високу теплопровідність і невелику густину металеві волокна і вуглецеві наноматеріали є двома найбільш поширеними компонентами, які використовуються для покращення теплопровідності ТАМФП [3–5]. Хоча вуглецеві наноматеріали мають високу хімічну стабільність та низьку корозійну активність, їх застосування має два недоліки. По-перше, це істотне збільшення вартості композитного ТАМФП. По-друге, це низька стійкість до незмінності рівномірного розподілу вуглецевих наночасток в матеріалі при циклічному тепловому навантаженні термоакумулятора. На підставі проведеного огляду було прийнято рішення зосередити подальші дослідження на оцінці доцільності застосування металевого волокна як добавки до ТАМФП, оскільки цей матеріал є дешевим та ефективним. Виконаний вище огляд експериментальних до-

сліджень показав, що використання металевих волокон в якості добавки до ТАМФП призводять к підвищенню теплопровідності та, як наслідок, збільшенню ефективності термоакумулявальних систем. При цьому комплексна оцінка впливу присутності різних видів металевого волокна при його різному вмісті у парафіні як ТАМФП залишається невивченою.

3. Цель и задачи исследования

Метою даної роботи є оцінка впливу присутності металевого волокна в парафіні на швидкість зарядки (нагріву) та розрядки (охладження) зразків композитних речовин з фазовим переходом для термоакумулявальних систем. Раціональний вибір виду металевого волокна та його кількості дасть можливість збільшити швидкість реакції термоакумулявальної речовини на теплові впливи й, тим самим, збільшити загальну ефективність термоакумулявальних систем.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- створити експериментальну установку для дослідження швидкості нагріву та охолодження композитних термоакумулявальних речовин з фазовим переходом;

- виконати експериментальне дослідження впливу металевого волокна в парафіні на швидкість зміни його температури в при нагріві та охолодженні в двох режимах: без фазового переходу матеріалу та з фазовим переходом тверде тіло – рідина.

4. Матеріали та методи дослідження

Для створення композитних ТАМФП використовувалися наступні матеріали:

- парафін (очищений технічний Т-3, температура плавлення 53,5 °С, країна-виробник – Польща);

- алюмінієве волокно (вата) з середнім діаметром волокна 30 мкм (постачальник – Ekksol, країна-виробник – Германія), теплопровідність (за даними виробника) $168 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$, вміст базового елемента – не менш ніж 92,2 мас. %;

- мідне волокно (вата) з середнім діаметром волокна 45 мкм (постачальник – Ekksol, країна-виробник – Германія), теплопровідність (за даними виробника) $383 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$, вміст базового елемента – не менш ніж 99,9 мас. %;

Зображення зразків армованого металевим волокном парафіну (у вигляді таблеток діаметром 23...25 мм та товщиною 4.5...5.5 мм) наведено на рис. 1.

Зразки композитних ТАМФП створювалися методом укладання певної кількості металевого волокна у вимірювальну комірку циліндричної форми з наступним заповненням її розплавленим парафіном при температурі 70 °С. Потрібна кількість компонентів композитних ТАМФП була виміряна з використанням електронних аналітичних ваг GR 300 з інструментальною похибкою 0,5 мг.

У табл. 1 наведено основні характеристики зразків ТАМФП, з застосуванням яких було проведено експериментальні дослідження.

Попереднє експериментальне дослідження [15] парафіну з вмістом алюмінієвого або мідного волокна показало суттєво збільшення теплопровідності твердої фази зразків композитних ТАМФП у порівнянні з чистим парафіном – табл. 2.

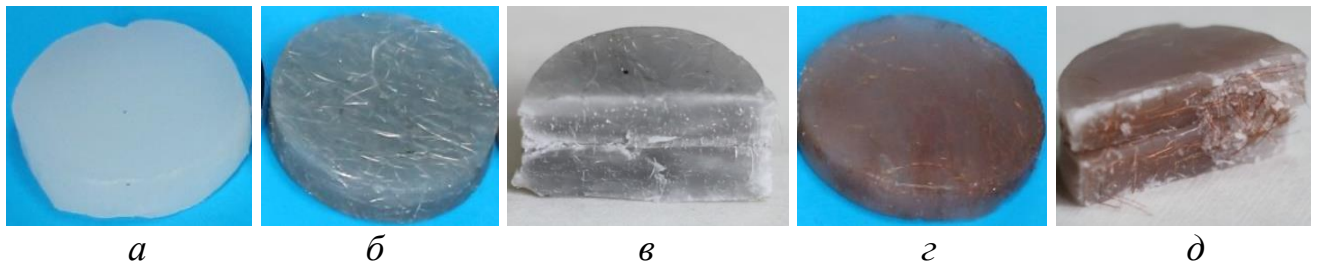


Рис. 1. Зображення зразків композитних ТАМФП: *a* – чистий парафін, *б* – парафін з вмістом $0,285 \pm 0,011 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ ($0,00968 \pm 0,00038 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$) алюмінієвого волокна, *в* – той самий зразок у розрізі; *г* – парафін з вмістом $0,756 \pm 0,150 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ ($0,00818 \pm 0,00174 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$) мідного волокна; *д* – той самий зразок у розрізі

Таблиця 1
Характеристика зразків ТАМФП – об'єктів дослідження

Позначення у тексті та рисунках	Металеve волокно (вата)	Маса металевого волокна, кг	Масова частка металевого волокна, $\text{кг} \cdot \text{кг}^{-1}$	Об'ємна частка металевого волокна, $\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$
PW	–	–	–	–
PW+Al I	Алюміній	0,1533	0,0174	0,00588
PW+Al II	Алюміній	0,4702	0,0515	0,01780
PW+Cu I	Мідь	0,4538	0,0498	0,00524
PW+Cu II	Мідь	1,2049	0,1222	0,01380

Таблиця 2
Теплопровідність зразків армованого металевим волокном парафіну як ТАМФП [15]

Матеріал	PW	PW+Al	PW+Cu
Масова частка металевого волокна, $\text{кг} \cdot \text{кг}^{-1}$	0	$0,285 \pm 0,011$	$0,756 \pm 0,150$
Об'ємна частка металевого волокна, $\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$	0	$0,00968 \pm 0,00037$	$0,00818 \pm 0,00175$
Теплопровідність, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	$0,256 \pm 0,0030$	$0,455 \pm 0,034$	$0,328 \pm 0,086$

Був отриманий інтересний результат з точки зору доцільності застосування армованого металевим волокном парафіну у промисловості. Показано (табл. 1), що менша масова частка алюмінієвого волокна в ТАМФП в порівнянні з масовою часткою мідного волокна дає більш високий приріст теплопровідність PW+Al у порівнянні з PW+Cu. Додатково слід звернути увагу, що алюмінієве волокно у порівнянні з мідним має більш низьку теплопровідності і більш низьку вартість. Тому його використання обґрунтовано можливістю подальшого практичного впровадження композитних ТАМФП в промисловість.

Подальше дослідження швидкості зарядки (нагріву) та розрядки (охолодження) запроваджені у вимірювальну комірку ТАМФП було проведено на оригінальній експериментальній установці.

5. Результати дослідження швидкості нагріву і охолодження досліджуваних зразків армованого металевим волокном парафіну

5.1. Експериментальна установка та методика експерименту

Експериментальне дослідження впливу наявності металевих волокон в парафіні на швидкість зарядки (нагріву) і розрядки (охолодження) зразків ТАМФП було проведено на експериментальній установці, схема якої наведена на рис. 2. Основними елементами установки є два рідинних термостата 6 та 10, в яких підтримувалися різні температури термостатування.

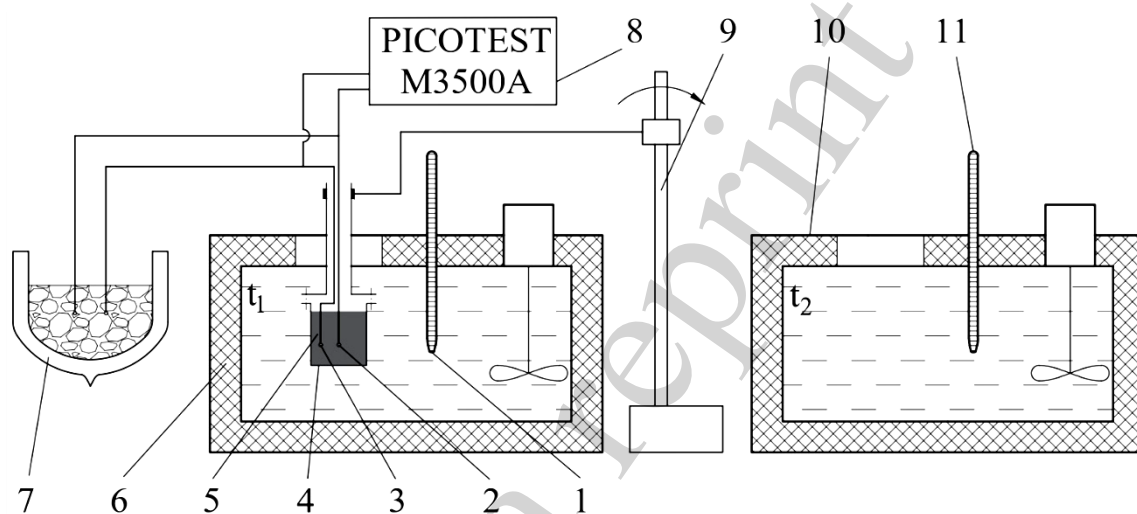


Рис. 2. Схема експериментальної установки для дослідження швидкості зарядки та розрядки комірки (капсули) з ТАМФП: 1, 11 – лабораторні термометри; 2, 3 – термопари; 4 – мідна вимірювальна комірка; 5 – ТАМФП; 6, 10 – термостати; 7 – посуд Дьюара з льодом для підтримки температури 0 °С; 8 – мультиметр; 9 – тримач комірки

Досліджувані зразки ТАМФП 4 знаходилися в вимірювальній комірці 5 виготовленої з міді, конструкція якої зображеної на рис. 3. Для дослідження швидкості зміни температури в зразках ТАМФП в тонкостінних металевих капілярах було встановлено дві абсолютні мідь-константанові термопари 2 та 3. Термопари було встановлено в середині висоти вимірювальної комірки: 2 – в центрі комірки та 3 – біля стінки комірки (на відстані 1,0 мм від стінки). Фіксація показань термопар здійснювалося мультиметром Picotest M3500A (Тайвань).

Експеримент проводився в два етапи. На першому етапі в термостатах 6 та 10 встановлювалися температури t_1 та t_2 ($t_1 > t_2$), відповідно. Комірка 4 охолоджувалася у термостаті 6 до досягнення t_2 у центрі. Після цього комірка 4 занурювалася в термостат 6 для нагріву (імітація процесу зарядки капсули з ТАМФП) з одночасним включенням системи автоматичної фіксації показань термопар 2 та 3 з інтервалом в 1 с. Після досягнення t_1 в центрі комірки 4 вона

переміщувалася в термостат 10 для охолодження (імітація процесу розрядки капсули з ТАМФП) з подальшою фіксацією зміни показань термопар 2 та 3 з часом. Експеримент було проведено при граничних умовах третього робу (постійний коефіцієнт тепловіддачі). Термічний опір як стінки вимірювальної комірки, так й тепловіддачі від води в термостаті до комірки були суттєво нижче, ніж термічний опір шару ТАМФП в комірці.

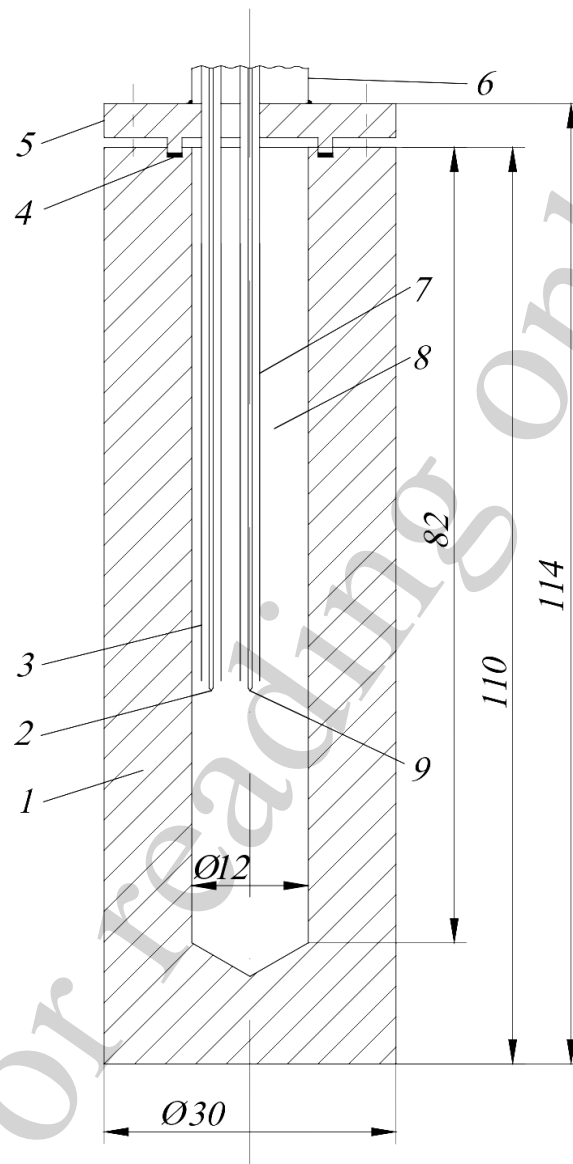


Рис. 3. Схематичне зображення вимірювальної комірки для дослідження процесів зарядки та розрядки композитних ТАМФП: 1 – мідний корпус; 2, 9 – термопари; 3, 7 – тонкостінні капіляри; 4 – ущільнююча прокладка; 5 – кришка; 6 – трубка; 8 – досліджуваний зразок ТАМФП

Експериментальні дослідження проводилися в двох режимах:

1) вимірювальна комірка, заповнена зразком ТАМФП, нагрівалася від 48 до 59 °С в центрі комірки після опускання її у воду з температурою 59 °С; після цього комірка охолоджували від 59 до 48 °С після опускання у воду з температурою 48 °С; при реалізації цього режиму очікується фазовий перехід в зразку ТАМФП;

2) вимірювальна комірка, заповнена зразком ТАМФП, нагрівалася від 30 до 40 °С в центрі комірки після опускання її у воду з температурою 40 °С; після цього комірка охолоджували від 40 до 30 °С після опускання у воду з температурою 30 °С; при реалізації цього режиму фазовий перехід в зразку ТАМФП не очікується.

5. 2. Результати дослідження швидкості нагріву і охолодження досліджуваних зразків армованого металевим волокном парафіну

На рис. 4 показано зміна температури парафіну в двох точках вимірювальної комірки (в центрі і біля стінки) під час процесів зарядки (нагрівання) і розрядки (охолодження) в режимі фазового переходу. На рис. 5–8 показано зміна температури з часом для зразків об'єктів дослідження в центрі вимірювальної комірки під час процесів зарядки і розрядки. Залежності температури від часу для чистого парафіну використовувалися в якості базової характеристичної температурної залежності для оцінки впливу присутності металевої вати з різним вмістом на швидкості нагріву і охолодження композитного ТАМФП. Очевидно, що температурне поле в циліндричній вимірювальній комірці завжди має симетричну форму щодо її осі.

З рис. 5–8 витікає, що всі досліджені зразки ТАМФП з металевої ватою мають більш високу швидкість нагріву та охолодження у порівнянні з чистим парафіном як в режимі з фазовим переходом, так і без.

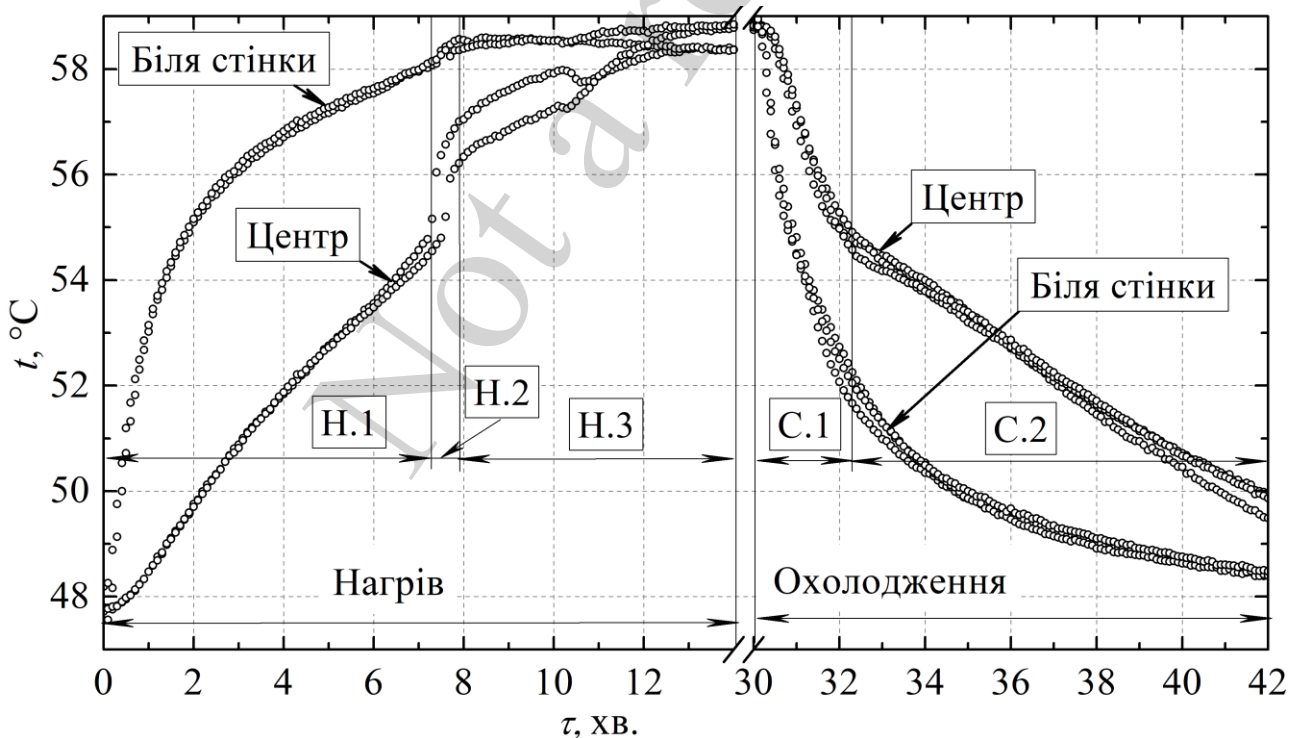


Рис. 4. Залежність температури від часу в центрі та біля стінки вимірювальної комірки, заповненої парафіном в режимі охолодження та нагріву з фазовим переходом

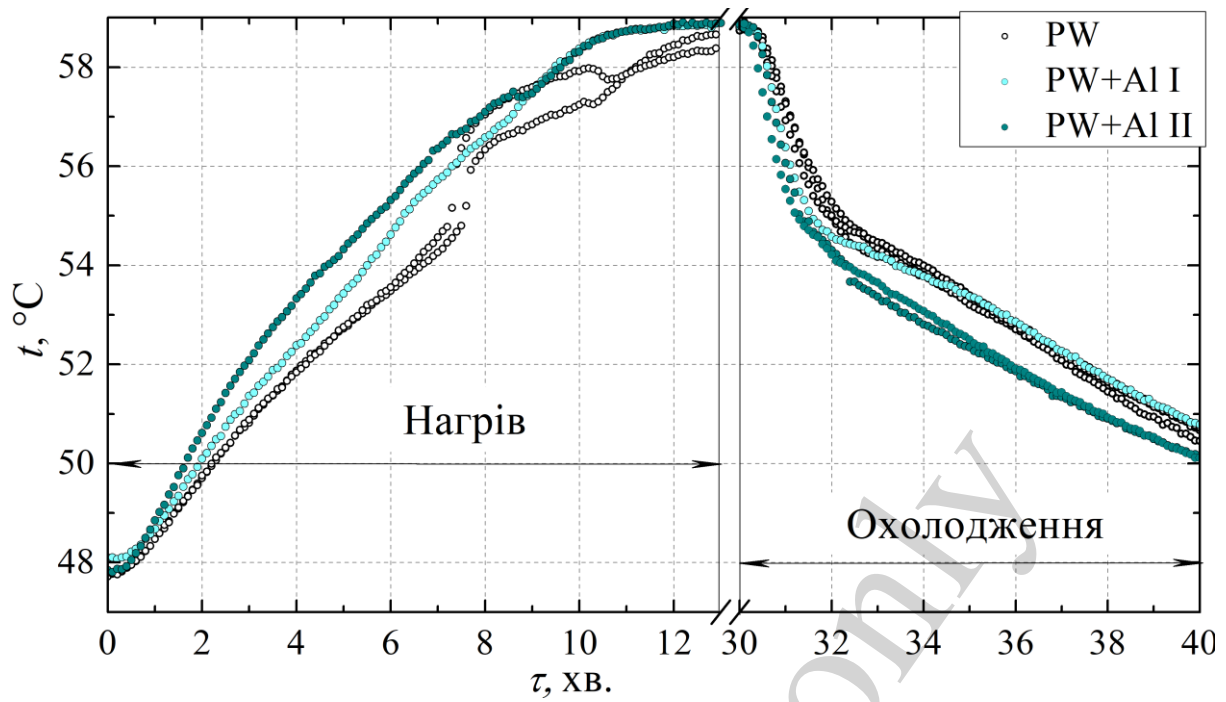


Рис. 5. Залежність температури від часу в центрі вимірювальної комірки, заповненої ТАМФП PW, PW+Al I та PW+Al II в режимі охолодження та нагріву з фазовим переходом

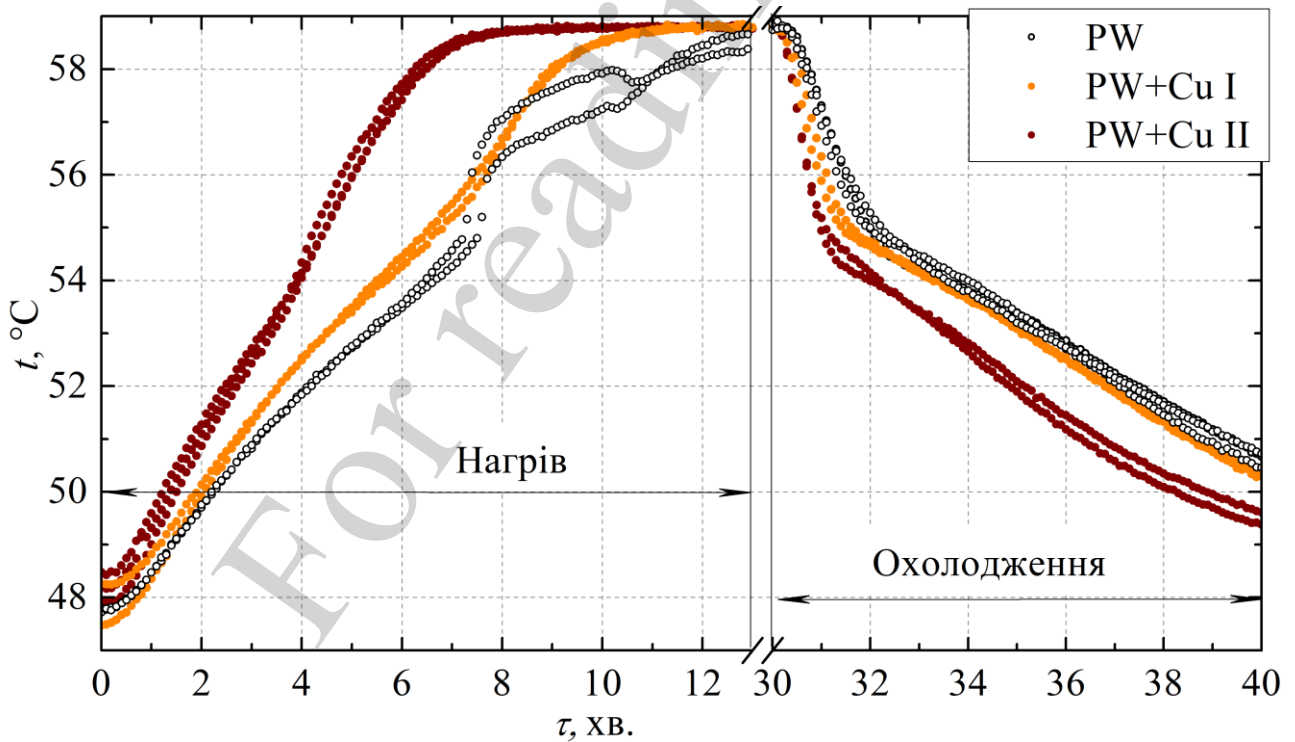


Рис. 6. Залежність температури від часу в центрі вимірювальної комірки, заповненої ТАМФП PW, PW+Cu I та PW+Cu II в режимі охолодження та нагріву з фазовим переходом

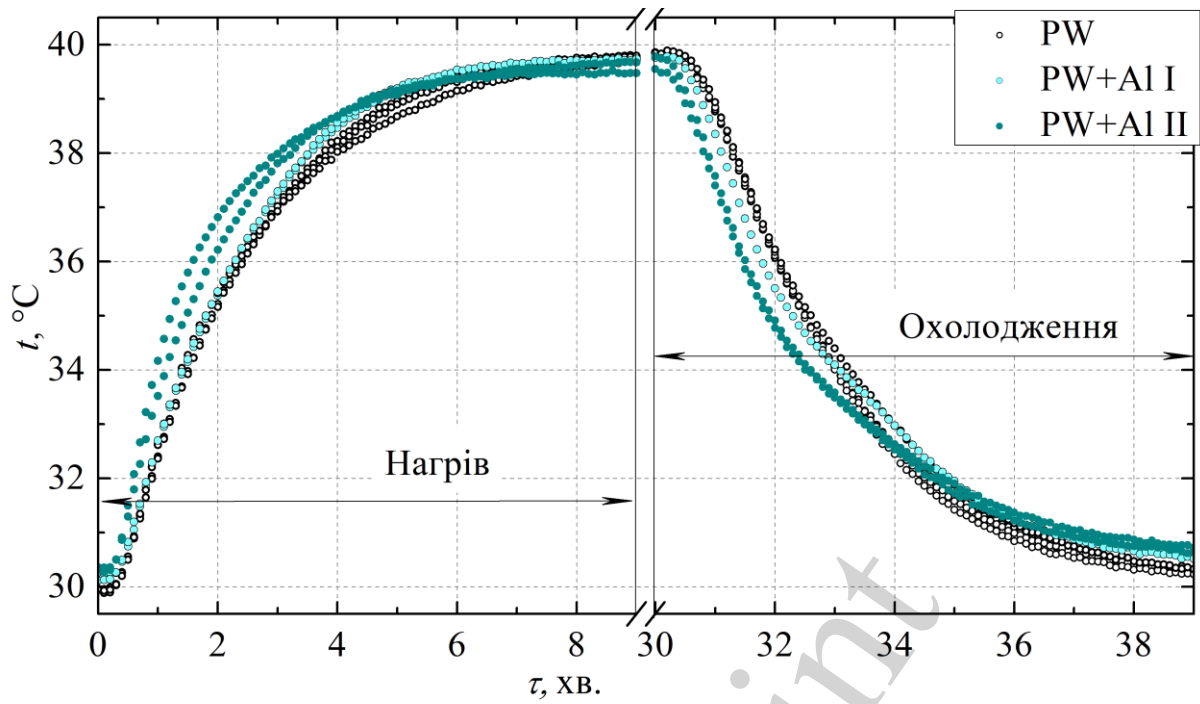


Рис. 7. Залежність температури від часу в центрі вимірювальної комірки, заповненої ТАМФП PW, PW+Al I та PW+Al II в режимі охолодження та нагріву без фазового переходу

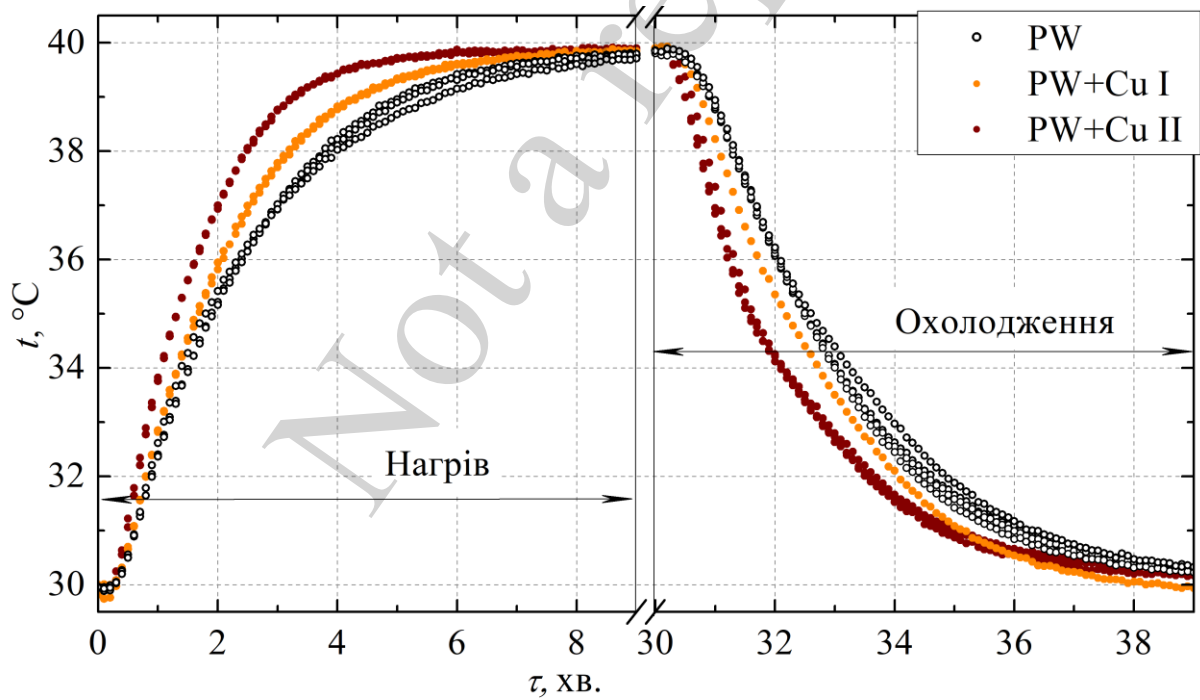


Рис. 8. Залежність температури від часу в центрі вимірювальної комірки, заповненої ТАМФП PW, PW+Cu I та PW+Cu II в режимі охолодження та нагріву без фазового переходу

6. Обговорення результатів дослідження швидкості нагріву і охолодження зразків армованого металевим волокном парафіну

Аналізуючи залежність температури зразка парафіну в центрі від часу в процесі зарядки (рис. 4), можна виділити три етапи. На першому етапі (Н.1) парафін в центрі виміральної комірки знаходиться в твердому стані. Ця частина поступово нагрівається за рахунок підведення теплоти через концентричні шари вже розплавленого парафіну (біля стінки комірки) і ще не розплавленого парафіну (в центрі комірки). Таким чином, в процесі зарядки співіснують дві області: область розплавленого ТАМФП і область твердого ТАМФП. У твердій області всередині твердої фази ТАМ Air buffer є переносу теплоти відповідає теплопровідність, а ця область отримує тепло від розплавленої частини за рахунок конвекції. Плавлення починається в області біля внутрішньої стінки комірки, далі розплавлений ТАМФП може піднятися у верхню частину комірки внаслідок природної конвекції – рис. 9 (Н.1). Другий етап (Н.2) характеризується досягненням температури плавлення в центрі. При цьому спостерігається скачок температури в центрі на величину приблизно $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ за дуже короткий проміжок часу (рис. 4). Ймовірно це пов'язано з конвективним підведенням теплоти з токами розплавленого парафіну з верхньої частини комірки – рис. 9 (Н.2). Рідкий парафін, що знаходиться у верхній частині комірки, є перегрітим відносно його температури плавлення. Біля стінки в цей момент часу (Н.2) так само спостерігаються незначні коливання температури (рис. 4). Ці коливання можна пояснити перерозподілом конвективних потоків у зв'язку зі зникненням перешкоди для їх циркуляції у вигляді твердої фази в центрі комірки. На третьому етапі (Н.3) спостерігається зниження темпу нагріву розплавленого парафіну. Це пояснюється перш за все зменшенням різниці температур між середовищем, що нагріває (водою в термостаті 6), і парафіном, а також внеском в вирівнювання температурного поля вільної конвекції.

При аналізі процесу розрядки (охолодження) (рис. 4) на першому етапі (С.1) спостерігається швидке зниження температури зразка парафіну в центрі. Це пов'язано як зі значною різницею температур по товщині концентричного шару парафіну в комірці (різниця показань термопар 2 і 3 рис. 2), так й з наявністю конвективних потоків у ще рідкому парафіні. При досягненні температури парафіну в центрі комірки приблизно $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ темп охолодження падає. Це пояснюється тим, що основна частина парафіну вже перейшла в твердий стан, а малого циліндричного об'єму в центрі вже не достатньо для суттєвого внеску природної конвекції в процес відведення теплоти. У цей момент починається другий етап (С.2) охолодження зразка парафіну в комірці, який характеризується невисокою швидкістю через малий перепад температур між парафіном і охолоджуючим середовищем, а також з причини переносу теплоти виключно теплопровідністю.

Як і очікувалося, зі збільшенням масової частки металевого волокна на нагрів і плавлення зразків ТАМФП однакового об'єму потребується менша тривалість часу – рис. 5–8. Тривалість часу на нагрів з урахуванням плавлення від 48 до $59\text{ }^{\circ}\text{C}$ для зразка чистого парафіну та зразків композитних ТАМФП PW+Al I, PW+Al II, PW+Cu I, PW+Cu II склала приблизно 13, 11, 10,5, 11, 8 хв.,

відповідно (рис. 5, 6). Отриманий результат підтверджує, що швидкість нагріву (з урахуванням плавлення) для композитних ТАМФП, що містять мідне волокно, знижуються суттєво у порівнянні з чистим парафіном. Так само спостерігається ефект збільшення швидкості нагріву зразків композитних ТАМФП в температурному режимі без фазового переходу (рис. 7, 8). Як і в режимі з фазовим переходом, найбільша швидкість нагрівання від 30 до 40 °С спостерігалася для зразка PW+Cu II: близько 6 хв. проти 9 хв. для нагріву зразка чистого парафіну.

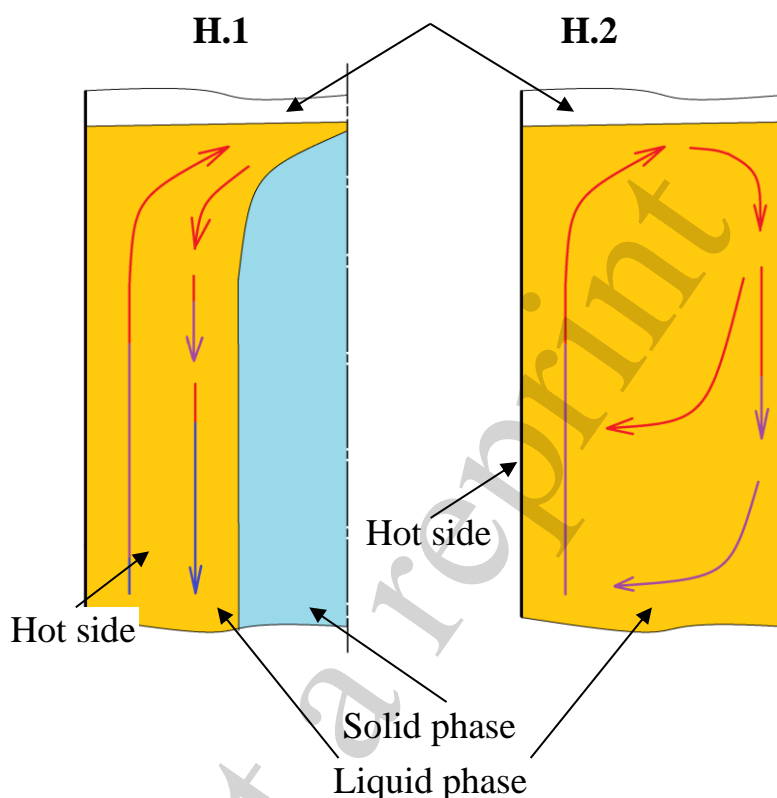


Рис. 9. Схематичне зображення конвективних потоків розплавленого парафіну в вимірювальній комірці в процесі її нагрівання в режимі з фазовим переходом

Зменшення часу нагрівання і плавлення зразків композитних ТАМФП з металевим волокном підтверджує покращення їх ефективної теплопровідності. Чим вище масова частка металевого волокна (як алюмінієвого, так і мідного), тим вище швидкість тепловіддачі в результаті зменшення термічного опору шару ТАМФП у стінки вимірювальної комірки. Слід відзначити, що в проведеному експерименті тепловий опір стінки вимірювальної комірки і тепловий опір тепловіддачі від води до стінки були менше, ніж ця величина для шару ТАМФП у комірці. Слід також відзначити (рис. 5–8), що обидва зразки PW+Cu характеризується більш високою швидкістю нагріву, ніж обидва зразки PW+Al, при приблизно рівному об'ємному вмісті металевого волокна (табл. 1). Попередні дослідження теплопровідності композитних матеріалів PW+Al та PW+Cu (табл. 2) при об'ємному вмісті алюмінієвого волокна в парафіні на 15 % більше, ніж мідного, показали збільшення теплопровідності PW+Al на 28 % в

порівнянні з $PW+Cu$. Така розбіжність може бути пояснена тим, що на теплопровідність зразків анізотропних матеріалів впливає не тільки теплопровідність матеріалу добавок, але й характер упаковки цих добавок в основному матеріалі (парафіні). Тому питання впливу добавок металевого волокна на теплопровідність композитних ТАМФП вимагає подальшого вивчення.

Як видно з рис. 5, 6, залежність температури від часу в центрі комірки зі зразками композитних ТАМФП в процесі зарядки (нагрівання) відрізняється більш плавним характером, ніж при нагріванні чистого парафіну. Тому є підстави вважати, що присутність металевої вати в ТАМФП частково пригнічує підйомно-спадні природні конвективні токи. Таким чином, основним механізмом передачі теплоти в рідкій фазі стає теплопровідність. Причому два чинники вносять вклад у збільшення величини ефективної теплопровідності композитних ТАМФП: передача теплоти по волокнам металу і наявність мікроконвективних потоків розплавленого парафіну всередині сформованої металевим волокном структури. Це опосереднене підтверджується наступними спостереженнями. По-перше, відсутністю області Н.2 на залежностях температури від часу для зразків композитного ТАМФП в процесі нагрівання (рис. 5, 6). По-друге, меншим ефектом присутності металевих волокон на швидкість нагріву зразків композитних ТАМФП в режимі без фазового переходу (в цьому випадку ефект мікроконвекції відсутній). Аналогічно при аналізі процесу розрядки (охолодження) зразків композитних ТАМФП (рис. 7, 8) спостерігається більш швидкий темп охолодження розплавленого парафіну в фазі С.1. При цьому досягається більш низька температура наприкінці цієї фази у порівнянні зі зразком чистого парафіну. Пояснюється цей факт тим, що передачі теплоти в радіальному напрямку не перешкоджають підйомно-спадні конвективні токи.

Отриманий результат має важливе практичне значення з наступних причин:

- розглянуті в цьому дослідженні зразки композитних ТАМФП можуть більш швидко акумулювати тепло, яке надходить від джерела теплоти, у порівнянні з чистим парафіном, який використовується як ТАМФП;

- з причини нерівномірного розподілу температури по висоті вертикальних контейнерів з ТАМФП [16], застосування армованого металевим волокном парафіну сприятиме швидшому вирівнюванню температурного поля.

На підставі виконаного аналізу можна рекомендувати подальше вивчення доцільності застосування мідного і алюмінієвого волокна в якості добавки до парафіну з пошуком його раціонального змісту в композитному ТАМФП. За результатами виконаного дослідження не було встановлено кількісного зв'язку з отриманими у [15] значеннями теплопровідності досліджуваних ТАМФП. Цей факт говорить о многофакторності впливу наявності металевих волокон на процеси зарядки та розрядки композитних ТАМФП. Крім того, залишається незрозумілим можливість моделювання процесів зарядки та розрядки капсули з ТАМФП на основі лише теплофізичних властивостей армованих металевим волокном ТАМФП (враховуючи анізотропію властивостей переносу у таких системах). Це питання потребує подальшого вивчення. Для більш обґрунтованої інтерпретації отриманих результатів мають бути проведені вимірювання калоричних властивостей чистого парафіну та парафіну, армованого металевим

волоконном. Ця інформація необхідна для того, щоб упевнитися, що розглянуті в даному дослідженні армовані металевим волокном ТАМФП на основі парафіну мають достатньо високе значення питомої кількості акумульованої теплоти. З практичної точки зору бажано, щоб воно було не нижче, ніж для чистого парафіну, при незначному збільшенні вартості за рахунок добавки раціональної кількості металевих волокон.

7. Висновки

1. Було створено експериментальну установку для дослідження швидкості нагріву та охолодження зразків композитних термоакумулювальних матеріалів з фазовим переходом на основі парафіну, армованого металевим волокном. Основним елементом установки є мідна циліндрична комірка, що заповнюється композитним термоакумулювальним матеріалом, яка може розглядатися як модель капсули термоакумулювальної системи. Особливістю установки є проведення експерименту в умовах, наближених до застосовуваних на практиці. При цьому відпадає необхідність у проведенні додаткових складних експериментів з вимірювання теплофізичних властивостей з подальшим розрахунковим моделюванням процесів нагріву або охолодження зразків.

2. Виконано експериментальне вимірювання залежностей температур в двох точках вимірювальної комірки, заповненої зразками чистого парафіну та парафіну, армованого металевим волокном. Досліджувалися два режими нагріву та охолодження зразків: від 48 до 59 °С (режим з фазовим переходом) та від 30 до 40 °С (режим без фазового переходу). Тривалість часу нагріву від 48 до 59 °С (з урахуванням плавлення) дорівнювала приблизно 13 хв. для зразка чистого парафіну. Для зразків парафіну зі вмістом алюмінієвого волокна в кількості 0,00588 й 0,01780 м³·м⁻³ час нагріву був меншим – приблизно 11 й 10,5 хв. відповідно. Для зразків парафіну зі вмістом мідного волокна у кількості 0,00524 й 0,01380 м³·м⁻³ час нагріву склав приблизно 11 й 8 хв., відповідно. Найбільша швидкість нагріву від 30 до 40 °С складала 6 хв. для зразків парафіну зі вмістом мідного волокна у кількості 0,01380 м³·м⁻³ у порівнянні з 9 хв. для зразка чистого парафіну. Було показано, що зі збільшенням масової частки металевих волокон процеси нагрівання та охолодження розглянутих об'єктів дослідження вимагають меншої тривалості часу як при наявності фазового переходу у ТАМФП, так і при його відсутності. Причому при рівних об'ємних частках металевих волокон використання мідного дає більший ефект, ніж алюмінієвого. Отримані ефекти підтвердили збільшення ефективної теплопровідності армованого металевим волокном парафіну у порівнянні з чистим парафіном. Присутність металевих волокон в парафіні частково пригнічує підйомно-спадні природні конвективні токи при плавленні термоакумулювального матеріалу. Таким чином, основним механізмом передачі теплоти в рідкій фазі композитного ТАМФП з металевим волокном є теплопровідність. Збільшення величини ефективної теплопровідності композитних термоакумулювальних матеріалів пояснюється передачею теплоти по волокнам металу і наявністю мікроконвективних потоків всередині сформованої металевим волокном структури (для розплавленого ТАМФП). Переважання передачі теплоти теплопровідністю для

композитного ТАМФП у розплавленому стані сприятиме швидшому вирівнюванню температурного поля по висоті термоакумулятивних елементів.

Подяки

Автори висловлюють вдячність Національному фонду досліджень України, проект № 2020.02/0125 за фінансову підтримку наведеного дослідження.

Література

1. Javadi, F. S., Metselaar, H. S. C., Ganesan, P. (2020). Performance improvement of solar thermal systems integrated with phase change materials (PCM), a review. *Solar Energy*, 206, 330–352. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.106>
2. Kahwaji, S., Johnson, M. B., Kheirabadi, A. C., Groulx, D., White, M. A. (2018). A comprehensive study of properties of paraffin phase change materials for solar thermal energy storage and thermal management applications. *Energy*, 162, 1169–1182. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.068>
3. Gasia, J., Maldonado, J. M., Galati, F., De Simone, M., Cabeza, L. F. (2019). Experimental evaluation of the use of fins and metal wool as heat transfer enhancement techniques in a latent heat thermal energy storage system. *Energy Conversion and Management*, 184, 530–538. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.085>
4. Nie, C., Deng, S., Liu, J. (2020). Effects of fins arrangement and parameters on the consecutive melting and solidification of PCM in a latent heat storage unit. *Journal of Energy Storage*, 29, 101319. doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101319>
5. Rostami, S., Afrand, M., Shahsavari, A., Sheikholeslami, M., Kalbasi, R., Aghakhani, S. et. al. (2020). A review of melting and freezing processes of PCM/nano-PCM and their application in energy storage. *Energy*, 211, 118698. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118698>
6. Manoj Kumar, P., Sudarvizhi, D., Stalin, P. M. J., Aarif, A., Abhinandhana, R., Renuprasanth, A. et. al. (2021). Thermal characteristics analysis of a phase change material under the influence of nanoparticles. *Materials Today: Proceedings*, 45, 7876–7880. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.505>
7. Karaipekli, A., Biçer, A., Sarı, A., Tyagi, V. V. (2017). Thermal characteristics of expanded perlite/paraffin composite phase change material with enhanced thermal conductivity using carbon nanotubes. *Energy Conversion and Management*, 134, 373–381. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.053>
8. Li, M., Mu, B. (2019). Effect of different dimensional carbon materials on the properties and application of phase change materials: A review. *Applied Energy*, 242, 695–715. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.085>
9. Atinafu, D. G., Yun, B. Y., Wi, S., Kang, Y., Kim, S. (2021). A comparative analysis of biochar, activated carbon, expanded graphite, and multi-walled carbon nanotubes with respect to PCM loading and energy-storage capacities. *Environmental Research*, 195, 110853. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110853>
10. Grosu, Y., Zhao, Y., Giacomello, A., Meloni, S., Dauvergne, J.-L., Nikulin, A. et. al. (2020). Hierarchical macro-nanoporous metals for leakage-free high-

thermal conductivity shape-stabilized phase change materials. *Applied Energy*, 269, 115088. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115088>

11. Prieto, C., Lopez-Roman, A., Martínez, N., Morera, J. M., Cabeza, L. F. (2021). Improvement of Phase Change Materials (PCM) Used for Solar Process Heat Applications. *Molecules*, 26 (5), 1260. doi: <https://doi.org/10.3390/molecules26051260>

12. Pan, M., Lai, W. (2017). Cutting copper fiber/paraffin composite phase change material discharging experimental study based on heat dissipation capability of Li-ion battery. *Renewable Energy*, 114, 408–422. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.004>

13. Zhelezny, V., Motovoy, I., Khliyeva, O., Lukianov, N. (2019). An influence of Al₂O₃ nanoparticles on the caloric properties and parameters of the phase transition of isopropyl alcohol in solid phase. *Thermochimica Acta*, 671, 170–180. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2018.11.020>

14. Zhelezny, V., Khliyeva, O., Motovoy, I., Lukianov, N. (2019). An experimental investigation and modelling of the thermal and caloric properties of nanofluids isopropyl alcohol - Al₂O₃ nanoparticles. *Thermochimica Acta*, 678, 178296. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2019.05.011>

15. Khliyeva, O. Ya., Nikulin, A. G., Zhelezny, V. P., Paskal, A. A., Semenyuk, Yu. V. (2021). Thermal conductivity of metal wool armored phase change materials for thermal energy storage. *Int. conf.: Functional materials for innovative energy*. Kyiv, 8.

16. Punniakodi, B. M. S., Senthil, R. (2021). A review on container geometry and orientations of phase change materials for solar thermal systems. *Journal of Energy Storage*, 36, 102452. doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102452>

Not a
Preprint