

Національна академія наук України  
Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного

ХІМЕНКО ОЛЕКСІЙ ВІКТОРОВИЧ



УДК 536.24:697.278

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ТВЕРДОТІЛЬНИХ  
ЕЛЕКТРОТЕПЛОВИХ АКУМУЛЯТОРІВ ШЛЯХОМ УДОСКОНАЛЕННЯ ЇХ  
ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Спеціальність 05.14.06 – «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного, м. Харків та Інституті відновлюваної енергетики Національної академії наук України, м. Київ.

**Науковий керівник**

доктор технічних наук, академік НАН України  
**Мацевитий Юрій Михайлович**,  
Інститут проблем машинобудування  
ім. А.М. Підгорного НАН України,  
почесний директор, завідувач відділом моделювання  
та ідентифікації теплових процесів.

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор,  
**Малярєнко Віталій Андрійович**,  
Харківський національний університет  
міського господарства ім. О.М. Бекетова,  
академік Академії наук Вищої освіти  
та Інженерної академії України,  
професор кафедри систем електроспоживання та  
електропостачання міст;

кандидат технічних наук, доцент  
**Кошельнік Олександр Вадимович**,  
Національний технічний університет «ХПІ»,  
доцент кафедри теплотехніки та  
енергоефективних технологій.

Захист відбудеться « 23 » березня 2017 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.180.02 Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України за адресою: 61046, м. Харків, вул. Дм. Пожарського, 2/10.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України за адресою: 61046, м. Харків, вул. Дм. Пожарського, 2/10.

Автореферат розісланий « 20 » лютого 2017 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
доктор технічних наук



Колодязна Л.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** На сьогоднішній день актуальним завданням для енергетики України є підвищення енергетичної ефективності існуючих систем теплопостачання у зв'язку з постійним зростанням ціни на природний газ. Однією з альтернатив газовому опаленню є електроопалення з використанням електротеплових акумуляторів (ЕТА). Акумуляування теплоти твердим теплоакумулюючим матеріалом (ТАМ) в ЕТА відбувається за рахунок нагріву його трубчастими нагрівальними елементами (ТЕН) у період мінімального навантаження енергосистеми в нічний час, коли діють знижені тарифні коефіцієнти на вартість споживаної електроенергії. У денний час відбувається нагрівання повітря в приміщенні шляхом проходження його через повітряні канали теплоакумулюючих елементів ЕТА, а також за рахунок конвективного теплообміну і випромінювання з поверхні корпусу ЕТА. Застосування ЕТА дозволить уникнути різкого зниження навантаження енергосистеми в нічний час і зменшити втрати електроенергії в електромережах, позбавить від перевитрат палива на АЕС і ТЕС, які пов'язані з переведенням електрогенераторів в режими, відмінні від номінальних, що призводить до зниження ККД енергоустановок. Таким чином, при широкому впровадженні ЕТА можуть виконувати функцію споживачів-регуляторів навантаження енергосистеми.

Використання систем електротеплоаккумуляційного опалення регламентується ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціювання» пункт 6.1.3, впровадження подібних систем електроопалення рекомендовано Державною цільовою економічною програмою енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива.

В якості ТАМ в ЕТА застосовуються досить дорогі матеріали магnezит або феоліт, тому важливим завданням є зменшення вартості ЕТА за рахунок використання більш дешевих акумулюючих матеріалів українського виробництва. Для цього необхідна комплексна оцінка ефективності роботи таких опалювальних систем, заснована на дослідженні теплофізичних властивостей теплоакумулюючих матеріалів і теплових процесів, що протікають в ЕТА.

Таким чином, підвищення ефективності роботи твердотільних електротеплових акумуляторів шляхом удосконалення їх динамічних характеристик є актуальною задачею, розв'язання якої сприятиме зниженню вартості і підвищенню ефективності роботи ЕТА та більш широкому їх застосуванню в Україні.

Рішення даної задачі може бути реалізовано за допомогою чисельних методів, а також шляхом проведення експериментальних досліджень для виявлення факторів, які впливають на характер та динаміку нагріву і охолодження теплоакумулюючих елементів з метою підвищення динамічних характеристик ЕТА в режимах заряду й віддачі теплоти.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Наукова робота за темою дисертації виконана у відповідності з державною науково-дослідною роботою № III-40-10 «Розробка теоретичних основ і методів реалізації теплових процесів на об'єктах паливно-енергетичного комплексу і житлово-

комунального господарства з метою енергозбереження та заміщення вуглеводневого палива» 2011-2013 рр. (№ ДР 0110U002658); з державною науково-дослідною роботою № III-14-13 «Розробити методи підвищення енергоефективності систем добування геотермальних ресурсів та їх комбінованого використання для виробництва електроенергії і теплоти із застосуванням підземного акумулювання», шифр «Геотерм-2» 2013-2017 рр. (№ ДР 0113U001715), де автор був виконавцем окремих розділів, а також згідно з «Державною цільовою економічною програмою енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010-2016 роки» (затверджено постановою Кабінету Міністрів № 447 від 27.04.2011 р. зі змінами № 929 від 11.11.2015 р.).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є дослідження теплообмінних процесів у твердих теплоакumuлюючих елементах електротеплового акумулятора для підвищення його динамічних характеристик в режимах заряду і віддачі теплоти.

Досягнення цієї мети пов'язане з вирішенням наступних завдань:

- сформулювати й адаптувати математичну модель теплових процесів до режимів роботи ЕТА;
- оцінити ефективність роботи ЕТА з різними видами теплоакumuлюючих матеріалів (ТАМ);
- провести комплексне (розрахункове та експериментальне) дослідження теплових процесів, що протікають в ЕТА в режимах заряду і віддачі теплоти;
- дослідити інерційність теплоакumuлюючих елементів ЕТА в режимах заряду і віддачі теплоти;
- виявити фактори, які впливають на характер та динаміку нагріву і охолодження теплоакumuлюючих елементів ЕТА і, відповідно, на процес акумулювання і віддачі теплоти;
- запропонувати енергоефективну конструкцію ЕТА з теплоакumuлюючими елементами, які забезпечують більш високу віддачу теплоти;
- на основі аналізу та узагальнення отриманих експериментальних даних запропонувати методіку теплотехнічного розрахунку ЕТА.

*Об'єктом дослідження* є твердотільні електротеплові акумулятори.

*Предметом дослідження* є теплообмінні процеси, що протікають в режимах заряду і віддачі теплоти, а також теплофізичні властивості ТАМ і теплові характеристики ЕТА.

*Методи дослідження.* Досягнення поставленої в роботі мети було реалізовано з використанням чисельного моделювання та розрахунково-експериментальних методів дослідження. Для моделювання теплообмінних процесів в ЕТА використовувався програмний комплекс ADINA 9.0 (навчальна версія). Обробка розрахунково-експериментальних даних здійснювалася за допомогою програм Microsoft Excel, Microsoft Visio та AutoCAD.

**Наукова новизна** полягає в наступному:

- адаптована математична модель теплообмінних процесів до режимів роботи ЕТА;

– вперше отримані експериментальні дані про розподіл температур в твердому теплоакумулюючому матеріалі ЕТА в режимах заряду і віддачі теплоти, за допомогою яких можна оцінити характер, динаміку нагріву і охолодження теплоакумулюючих елементів;

– вперше дана кількісна і якісна оцінка ефективності акумулювання і віддачі теплоти ЕТА в абсолютних і відносних величинах та визначені теплові характеристики ЕТА в режимах заряду і віддачі теплоти;

– отримані аналітичні залежності для визначення надлишкової температури теплоакумулюючих елементів ЕТА з шамоту і магнезиту з урахуванням їх темпу охолодження.

#### **Практичне значення отриманих результатів:**

– оцінена ефективність акумулювання теплоти різними видами ТАМ;

– запропонована конструкція ЕТА з шамотними теплоакумулюючими елементами і каналами круглої форми, яка дозволить збільшити віддачу теплоти в каналах теплоакумулюючих елементів на 15 %, а також знизити кінцеву вартість ЕТА мінімум на 15 % в порівнянні з існуючими аналогами;

– запропонована методика теплотехнічного розрахунку ЕТА, в якій враховані теплові характеристики ЕТА в режимах заряду і віддачі теплоти, отримані в результаті обробки експериментальних даних, та видані практичні рекомендації щодо вибору твердих ТАМ з метою використання їх в ЕТА.

Результати роботи прийняті до впровадження в Інституті відновлюваної енергетики НАН України для реалізації системи електроопалення з використанням твердотільних електротеплових акумуляторів (ЕТА), а також внесені в навчальний план спеціальності «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії» кафедри відновлюваних джерел енергії Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут" ім. Ігоря Сікорського з наступних дисциплін: «Перетворювання та акумулювання енергії відновлюваних джерел», «Комплексне використання відновлюваних джерел енергії», «Перспективні технології у нетрадиційній та відновлюваній енергетиці», «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії».

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні наукові та експериментальні результати, які представлені в дисертаційній роботі, отримані здобувачем особисто. Роботи [5 - 13] написані автором самостійно. В друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автору належать: формування цілей та постановка завдань дослідження [1, 2]; формування та адаптація математичної моделі теплообмінних процесів, що протікають в ЕТА в режимах заряду і віддачі теплоти, а також підвищення динамічних характеристик ЕТА за рахунок зміни геометричних параметрів повітряних каналів теплоакумулюючих елементів [3, 4].

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертації і основні її результати доповідались та обговорювались на наступних науково-технічних конференціях і семінарах: 1-й Науково-технічній конференції «Строительная теплофизика и инженерные методы снижения энергопотребления зданий» с. Соколівка, Козелецького району, Чернігівської області, 5-8 вересня 2011 р., Конференції молодих вчених та спеціалістів «Сучасні проблеми машинобудування» м. Харків, 5-8 листопада 2012 р., Міжнародній науково-практичній конференції

«Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований» м. Москва, РФ, 4-5 березня 2013 р., II Міжгалузевій науково-практичній конференції молодих вчених і фахівців в області проектування підприємств гірничо-металургійного комплексу, енерго- та ресурсозбереження, захисту навколишнього середовища «Инновационные пути модернизации базовых отраслей промышленности, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей среды» м. Харків, 27-28 березня 2013 року, IX та X Міжнародних наукових конференціях «Проблемы энергосбережения и пути их решения» м. Харків, НТУ«ХП» (24-25 квітня 2013 р., 23-24 квітня 2014 р.), XIII Міжнародній науково-практичній конференції «Интегрированные технологии и энергосбережение» м. Харків, НТУ «ХП», 13-16 травня 2013 року, IX Міжнародній науково-практичній конференції «Стратегия качества в промышленности и образовании» м. Варна, Болгарія, 31 травня - 7 червня 2013 року, Семінарі «Перспективы комплексного использования возобновляемых источников энергии для автономного жизнеобеспечения отдельной садиби» урочище «Бурлівщина» м. Переяслав-Хмельницький - Київ, 26 червня 2014 р., XV і XVI Міжнародних конференціях «Відновлювана енергетика XXI століття» м. Київ, НТУУ «КПІ» (16-17 вересня 2014 р., 28-29 травня 2015 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми систем теплогазопостачання і вентиляції, водопостачання і водовідведення» м. Рівне, 11-13 березня 2015 р., Семінарі «Можливості комплексного використання екологічно чистих джерел енергії для енергозабезпечення окремої садиби в середній полосі України» урочище «Бурлівщина» м. Переяслав-Хмельницький - Київ, 03 серпня 2015 р., Міжнародній науково-технічній конференції «Енергетичні та теплотехнічні процеси і устаткування» м. Харків, НТУ «ХП», 27-28 квітня 2016 р., Міжнародній науково-технічній конференції «ЕкоКомфорт» м. Львів, НУ «Львівська політехніка», 11-12 жовтня 2016 р.

**Публікації.** Основний зміст дисертаційної роботи і її положення викладені в 13 наукових працях, з них 8 – статей у наукових фахових виданнях, рекомендованих МОН України, з яких 3 статті в журналах, які входять до списку міжнародних наукометричних баз даних Google Scholar, Index Copernicus, 5 – у вигляді тез доповідей на науково-технічних конференціях.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 4-х розділів, висновків, переліку використаних джерел (123 найменування) і 2-х додатків. Дисертаційна робота викладена на 161 сторінках, з них 117 сторінок основного тексту, містить 52 рисунка та 15 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

*У вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета і завдання дослідження, показано зв'язок з науковими темами і програмами, висвітлені наукова новизна і практичне значення роботи, особистий внесок здобувача, наведено відомості про апробацію та публікації основних результатів дисертації.

*У першому розділі* представлено аналітичний огляд робіт в області теплового акумулювання таких українських та зарубіжних вчених: В.Д. Левенберга,

Г. Бекмана, О.В. Діхтієвського, В.О. Григор'єва, Д.І. Розинського, В.Н. Богословського, А.Ю. Гілюса, І.І. Шатейкіса, А.А. Симонова, Дж. А. Даффі. Розглянуто особливості конструкцій різних типів теплових акумуляторів (ТА), їх режимів роботи, схем теплопостачання з використанням ТА і основні напрямки досліджень в області акумулювання теплоти. Проаналізовано теплові процеси, що протікають в ТА в режимах заряду і віддачі теплоти, а також розглянуті існуючі математичні моделі, які описують дані процеси. Проаналізовані пред'явлені вимоги і техніко-економічне обґрунтування застосування електротеплоакумуляційних систем опалення. Розглянуто основні види твердих теплоакумуляюючих матеріалів (ТАМ), а також їх теплофізичні властивості. Проведений огляд літературних джерел показав, що процеси теплового акумулювання досить добре вивчені в ТА теплоємнісного типу з пористою матрицею, ТА рідинного типу, а також ТА з фазовим переходом. Варто відзначити, що досить слабо досліджені електротеплові ТА каналного типу.

Аналіз робіт в області теплового акумулювання в різних середовищах і сферах їх застосування дозволив зробити висновок, що існуючі математичні моделі, які описують теплові процеси в ТА в режимах заряду, зберігання і віддачі теплоти з пористою матрицею для систем геліотеплопостачання, твердотільних ТА каналного типу для утилізації теплоти відхідних димових газів на промислових об'єктах, ТА фазового переходу, а також ємнісних водяних ТА не можуть бути застосовані для опису теплообмінних процесів і оптимізації сучасних компактних ЕТА, зважаючи на істотні відмінності їх функціонального призначення та конструктивні, режимні і температурні параметри їх роботи.

Найбільш перспективним видом ТА для широкого впровадження в якості опалювальних систем є електротеплові акумулятори, які при широкому впровадженні будуть виконувати функцію споживачів-регуляторів енергосистеми для заповнення провалів в нічний час, споживаючи при цьому електроенергію за тарифами, диференційованими за періодами часу.

На основі проведеного аналізу літературних джерел сформульована мета дослідження, визначено напрями наукових досліджень і комплекс завдань, які необхідно вирішити для її досягнення, а також об'єкт, предмет і методи досліджень.

*У другому розділі* була сформована і адаптована математична модель теплообмінних процесів, що протікають в ЕТА в режимах заряду і віддачі теплоти, для стандартного теплоакумуляюючого елемента з каналами щілиноподібної форми, а також для елементів з каналами круглої форми. Для оцінки впливу геометричної форми повітряного каналу на розподіл температури в теплоакумуляюючому елементі ЕТА було проведено розрахунок нестационарного температурного поля теплоакумуляюючого елемента заданих розмірів з декількома варіантами геометричних форм і розмірів повітряного каналу (рис. 1) шляхом рішення двовимірної прямої нестационарної задачі теплопровідності методом кінцевих елементів за допомогою програмного комплексу ADINA 9.0 (навчальна версія). Досліджувалися теплоакумуляюючі елементи ЕТА з магнезиту і шамоту.

Слід зазначити, що по висоті повітряного каналу умови теплообміну змінюються, що робить задачу теплової взаємодії потоку повітря і стінок каналу тривимірною. Вочевидь, що тривимірна задача може бути зведена до серії двовимірних задач в горизонтальних перетинах ЕТА, якщо задати температуру

повітря в кожному з перетинів з урахуванням його нагріву в попередніх ділянках каналу. Були розглянуті три перетини елементів ЕТА. Проведені попередні розрахунки показали, що різниця між отриманими температурами стінки повітряного каналу теплоакумулюючого елемента в розглянутих перетинах по висоті становить не більше 30 °С, тобто коливання температури по висоті незначне. Тому прийнято рішення виконувати математичне моделювання теплових процесів в теплоакумулюючому елементі ЕТА в режимах заряду і віддачі теплоти, використовуючи двомірну модель теплоакумулюючого елемента.

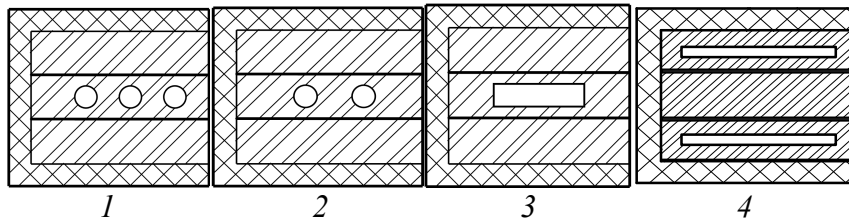


Рис. 1. Схеми розглянутих теплоакумулюючих елементів з різною формою повітряних каналів:

1 – схема теплоакумулюючого елемента з трьома повітряними каналами круглого перетину; 2 – те ж з двома каналами; 3 – те ж з одним каналом прямокутного перетину; 4 – те ж з двома каналами прямокутного перетину (стандартна конструкція)

Математична модель теплообмінних процесів при нагріванні та охолодженні твердого теплоакумулюючого елемента ЕТА включає в себе двомірне нестационарне рівняння теплопровідності з заданими початковими та граничними умовами:

$$c\rho \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T_i}{\partial y} \right) + q_{V_{\text{ТЕН}}}(\tau, x, y),$$

$$q_{V_{\text{ТЕН}}} = \begin{cases} \frac{Q_{\text{ТЕН}}(\tau)}{V_{\text{ТЕН}}}(x, y) \in \Omega_{\text{ТЕН}} \\ 0 & (x, y) \notin \Omega_{\text{ТЕН}}, \end{cases} \quad (1)$$

$$Q_{\text{ТЕН}}(\tau) = \begin{cases} \text{const} \neq 0 \text{ в режимі заряду,} \\ 0 \text{ в режимі віддачі теплоти,} \end{cases}$$

де  $T_i(x, y, \tau)$  – температура в  $i$  шарі ТАМ,  $i = 1 \dots n$ , °С;  $q_{V_{\text{ТЕН}}}(\tau, x, y)$  – питома об'ємна щільність тепловиділення ТЕН, Вт / м<sup>3</sup>;  $\tau$  – час, с.

Крайові умови для теплоакумулюючого елемента стандартної конструкції з каналами щілиноподібної форми обрані з урахуванням роботи ЕТА в режимах заряду і віддачі теплоти:

– ПУ: при  $\tau = 0$ ,  $T = T_{p1} = T_p$ ;

– на межі  $\Gamma_1$ :  $\alpha_{\kappa 1}(T_{\text{ск1}}|_{\Gamma_1} - T_{\text{ж1}}) = -\lambda_1 \frac{\partial T_{\text{ск1}}}{\partial n} \Big|_{\Gamma_1}$ ;  $\alpha_{\kappa 1} = \alpha_{\kappa 1}(\tau)$ ;  $T_{p1} = T_{p1}(\tau)$ ;

– на  $\Gamma_2$ :  $\alpha_{\kappa 2}(T_{\text{ск2}}|_{\Gamma_2} - T_{p1}) = -\lambda_1 \frac{\partial T_{\text{ск2}}}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2}$ ;  $\alpha_{\kappa 2} = \alpha_{\kappa 2}(\tau)$ ;  $T_{p1} = T_{p1}(\tau)$ ;



$$- \text{ на } \Gamma_3: -\lambda_{\text{із}} \frac{\partial T_{\text{із}}}{\partial n} \Big|_{\Gamma_3} = \alpha_3 (T_{\text{із}} \Big|_{\Gamma_3} - T_p) + \varepsilon c_0 \left[ \left( \frac{T_{\text{із}} \Big|_{\Gamma_3} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_p + 273}{100} \right)^4 \right]; \alpha_3 = \alpha_3(\tau).$$

Крайові умови для теплоакумулюючого елемента з каналами круглої форми:

$$- \text{ ПУ: при } \tau = 0, T = T_{p1} = T_p;$$

$$- \text{ на } \Gamma_1: \alpha_k (T_{\text{ск}} \Big|_{\Gamma_1} - T_{p1}) = -\lambda_1 \frac{\partial T_{\text{ск}}}{\partial n} \Big|_{\Gamma_1}; \alpha_k = \alpha_k(\tau); T_{p1} = T_{p1}(\tau);$$

$$- \text{ на } \Gamma_3: -\lambda_{\text{із}} \frac{\partial T_{\text{із}}}{\partial n} \Big|_{\Gamma_3} = \alpha_3 (T_{\text{із}} \Big|_{\Gamma_3} - T_p) + \varepsilon c_0 \left[ \left( \frac{T_{\text{із}} \Big|_{\Gamma_3} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_p + 273}{100} \right)^4 \right]; \alpha_3 = \alpha_3(\tau).$$

Схеми теплоакумулюючих елементів з каналами щілиноподібної форми і каналами круглої форми з заданими граничними умовами (ГУ) представлені на рис. 2.

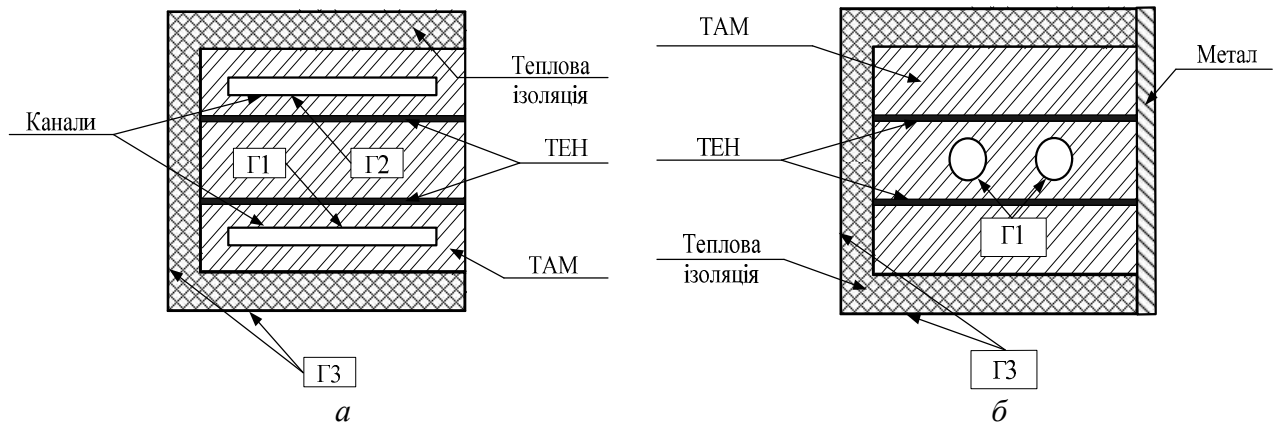


Рис. 2. Горизонтальні перетини теплоакумулюючих елементів з каналами: а щілиноподібної форми; б з круглими каналами.

Теплоакумулюючий елемент з каналами круглої форми на рис. 2 (б) при моделюванні теплових процесів для шамоту доповнений металевою пластинкою товщиною 2 мм для збільшення динаміки нагріву шамоту в режимі заряду ЕТА. На рис. 3 представлені задані ГУ для розглянутих теплоакумулюючих елементів із зазначенням часових проміжків згідно з режимами заряду і віддачі теплоти ЕТА.

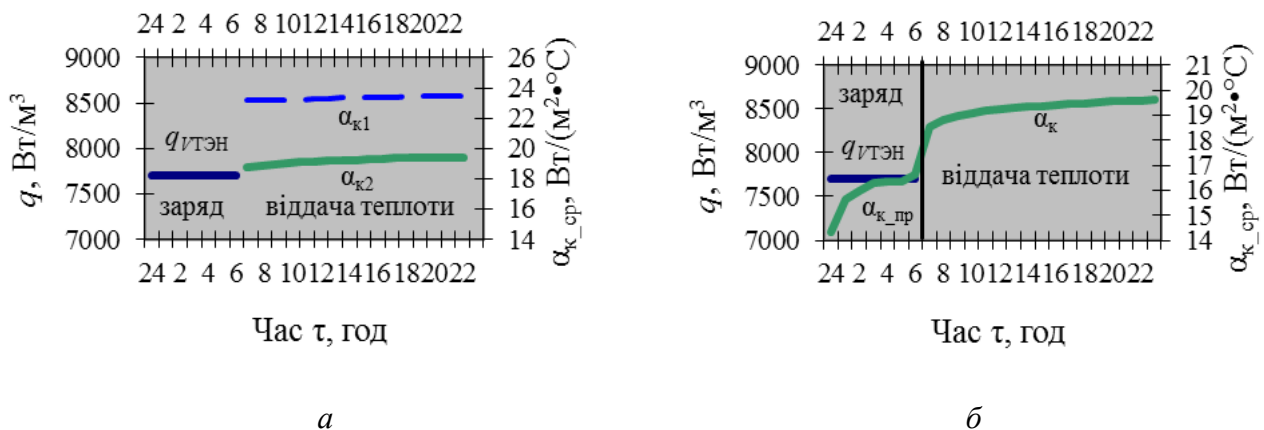


Рис. 3. Зміна ГУ у часі при моделюванні теплових процесів у теплоакумулюючих елементах з щілиноподібними (а) і круглими каналами (б)

В результаті проведення чисельного моделювання теплообмінних процесів отримано розподіл температурних полів в теплоакумуючих елементах в кінці режиму віддачі теплоти ЕТА (рис. 4).

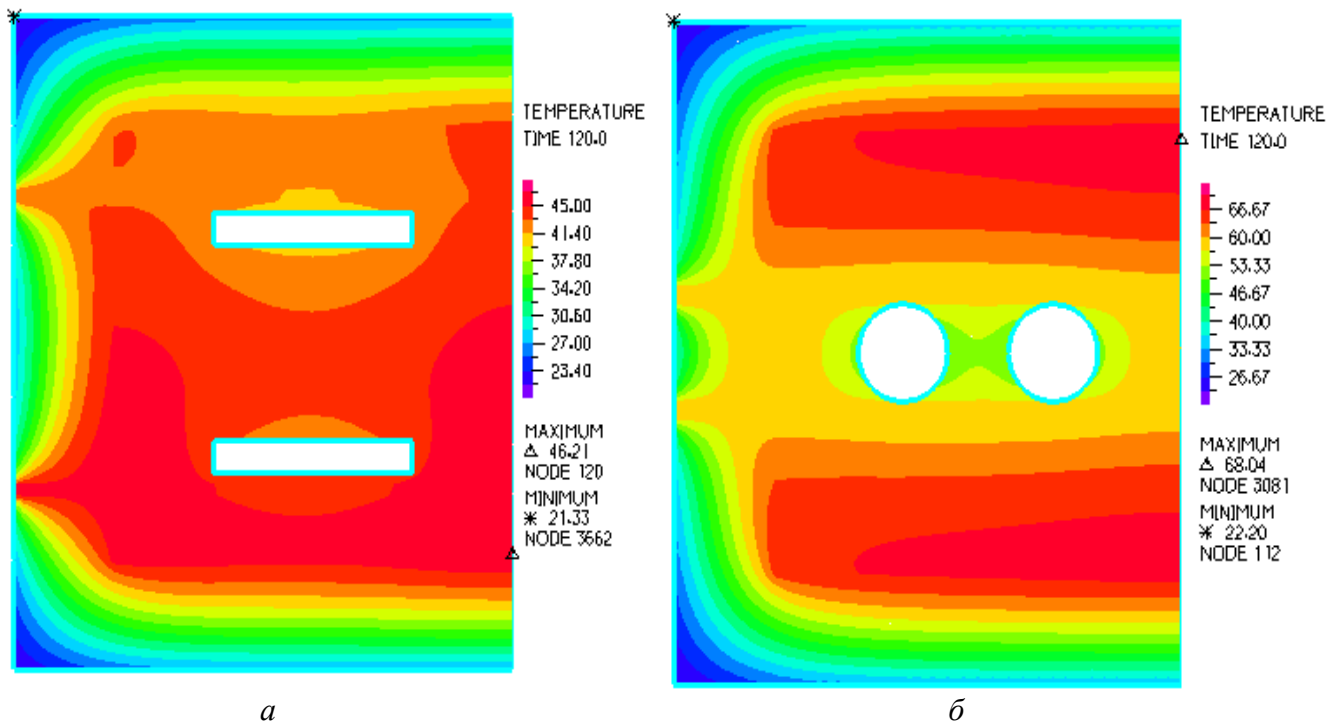


Рис. 4. Розподіл температурних полів в теплоакумуючому елементі з магнезиту в кінці режиму віддачі теплоти ЕТА:

*а* – схема теплоакумуючого елемента з двома каналами прямокутного перетину (стандартна конструкція); *б* – те ж з двома каналами круглого перетину

Відзначено, що темп охолодження теплоакумуючого елемента з двома каналами круглого перетину значно вищий, ніж у теплоакумуючого елемента з щілиноподібними каналами стандартної конструкції (рис. 4 *а*, *б*), що забезпечує більш високу віддачу теплоти ЕТА. Також спостерігається більш рівномірний розподіл температури в центрі теплоакумуючого елемента і в області, де розташовані повітряні канали, на відміну від стандартної схеми теплоакумуючого елемента, що призводить до менших температурних напружень в теплоакумуючих елементах і збільшення терміну їх експлуатації. Динаміка зміни температури стінки каналів теплоакумуючих  $T_{ск}$  елементів представлена на рис. 5.

Аналізуючи отримані результати розрахункового дослідження (рис. 4 - 5), можна зробити висновок, що найбільш ефективною є схема теплоакумуючого елемента з двома каналами круглого перетину. Дана схема дозволяє підвищити динаміку заряду, що відображає температура  $T_{ск}$  в кінці періоду заряду (рис. 5), і динаміку віддачі теплоти в повітряних каналах теплоакумуючих елементів ЕТА (рис. 4). Можна також зробити висновок про малу ефективність стандартної схеми теплоакумуючого елемента з П-подібною схемою руху повітряного потоку по двох каналах прямокутного перетину.

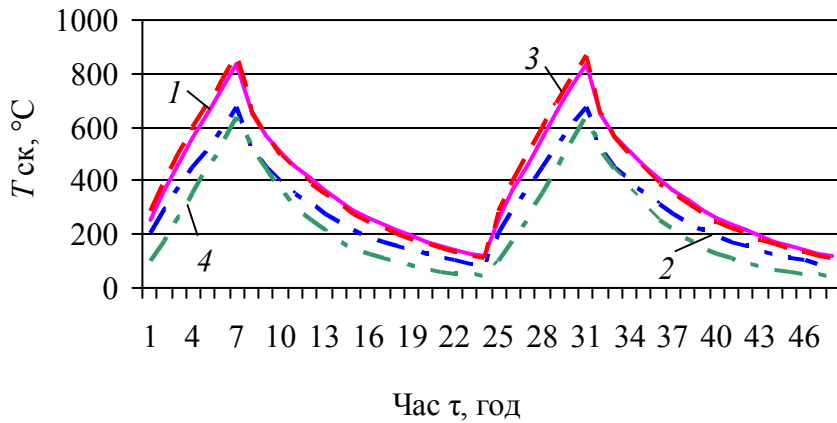


Рис. 5. Зміна температури стінки  $T_{ск}$  повітряного каналу в режимах заряду і віддачі теплоти: 1 – схема теплоакумулюючого елемента з двома повітряними каналами круглого перетину; 2 – те ж з трьома каналами; 3 – те ж з одним каналом прямокутного перетину; 4 – те ж з двома каналами прямокутного перетину

Також проведено моделювання теплових процесів в теплоакумулюючому елементі з шамоту з двома каналами круглого перетину. ГУ задаються таким же чином, як і для теплоакумулюючого елемента з магнезиту, тільки з урахуванням впливу металевої пластини (рис. 2 б, рис. 3 б). Отримано розподіл температурних полів в теплоакумулюючому елементі з шамоту з двома каналами круглої форми в кінці режиму віддачі теплоти ЕТА (рис. 6).

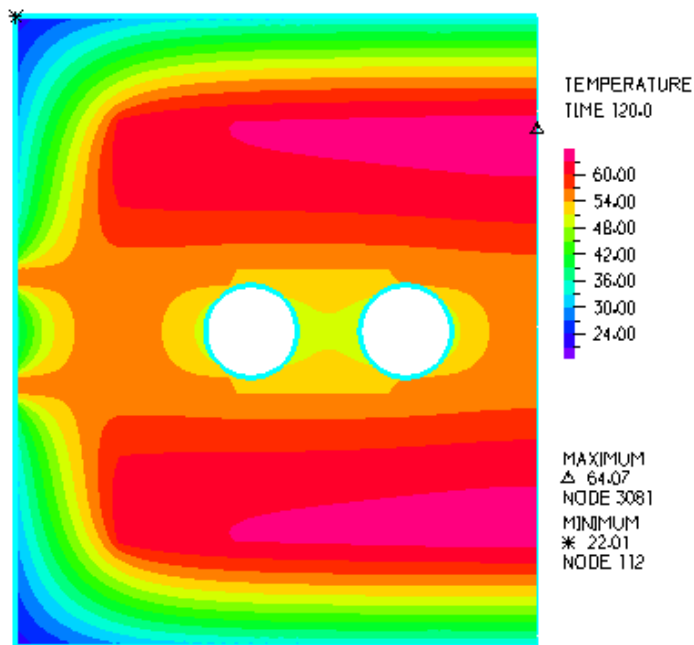


Рис 6. Розподіл температурних полів в теплоакумулюючому елементі з шамоту з каналами круглої форми в кінці режиму віддачі теплоти ЕТА

**У третьому розділі** проведено серію експериментів з дослідження теплових процесів в твердих ТАМ з високими теплоакумулюючими властивостями. Експериментальні дослідження проводилися в 2 етапи: на першому етапі досліджувалися динамічні характеристики теплоакумулюючих елементів з магнезиту із щілиноподібними повітряними каналами розміром  $0,19 \times 0,02$  м і загальною масою 62,5 кг, а на другому – теплоакумулюючі елементи з шамоту із каналами круглого перетину ( $d_k = 0,044$  м) і загальною масою 58 кг. Заміри температур проводились термопарами хромель-алюмель (ХА) в керамічній оболонці

і хромель-копель (ХК). Термопары ХК застосовувалися для вимірювання температури повітря на виході з ЕТА, температури поверхні корпусу ЕТА і температури теплової ізоляції. Схеми експериментальної установки для двох етапів експерименту, а також місця установки термопар показані на рис. 7, де: Т1 – вимір температури стінки повітряного каналу теплоакумлюючого елемента в нижній і верхній зоні ЕТА (ТХА); Т2 – вимір температури повітря, що нагрівається в нижній і верхній зоні ЕТА (ТХА); Т3 – вимір температури повітря, що нагрівається на виході з ЕТА (ТХК); Т4 – вимір температури на поверхні корпусу ЕТА (ТХК); Т5 – вимір температури в товщі теплоакумлюючого елемента ЕТА (ТХА); Т6 – вимір температури в товщі теплової ізоляції в нижній і верхній зоні (ТХК).

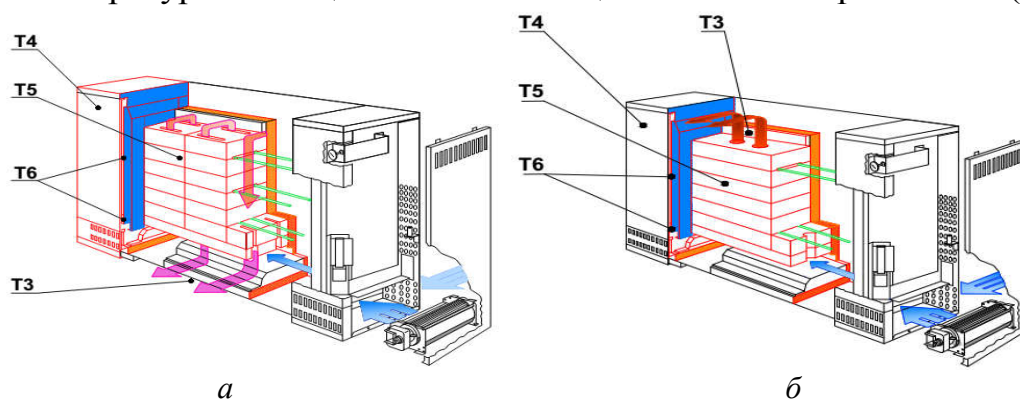
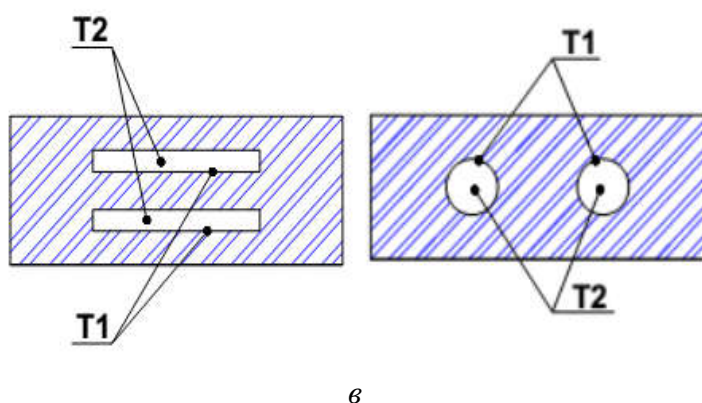


Рис. 7. Схема експериментальних установок по дослідженню динамічних характеристик теплоакумлюючих елементів ЕТА:



*a, б* – схема ЕТА з теплоакумлюючими елементами з прямокутними повітряними каналами (стандартна конструкція) і з каналами круглого перетину із зазначенням місць установки термопар ХА; *в* – місця установки термопар ХА в теплоакумлюючих елементах в нижній і верхній зоні ЕТА

Результати експериментальних досліджень динамічних характеристик ЕТА з теплоакумлюючими елементами з шамоту і магнезиту наведені на рис. 8.

Для збільшення темпу нагріву теплоакумлюючих елементів з шамоту на 2-му етапі експерименту використовувалися сталеві пластини товщиною 2 мм, які уклалися між теплоакумлюючими елементами ЕТА.

Проаналізувавши отриманий розподіл температури  $T_{ск}$  в стінці каналів теплоакумлюючих елементів, можна зробити висновок про те, що в режимі віддачі теплоти темп охолодження значно вищий у шамотних теплоакумлюючих елементах, ніж у магнезитових. Це пояснюється формою повітряних каналів, більш рівномірним розподілом температури в теплоакумлюючих елементах, а також більшим температурним напором між температурою стінки каналу і температурою повітря, що нагрівається в каналі, ніж в повітряних каналах теплоакумлюючих елементів з магнезиту (рис. 8 *a, з*).

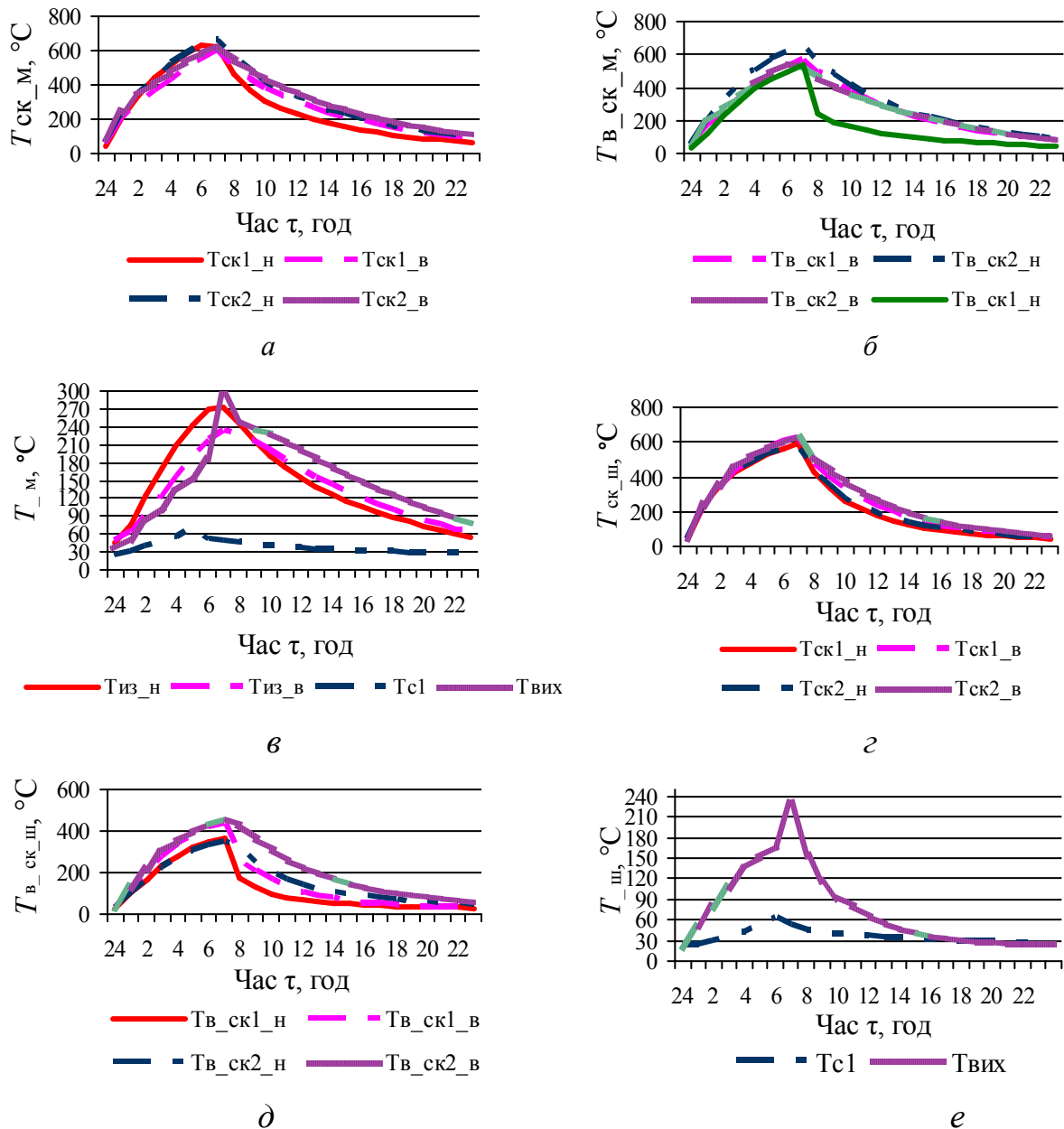


Рис. 8. Результати експериментальних досліджень динамічних характеристик теплоакуюючих елементів ЕТА:

*a, г* – зміна температури  $T_{ск}$  стінки каналу теплоакуюючих елементів з каналами прямокутного перетину й з каналами круглого перетину відповідно в нижній і верхній зонах протягом режиму заряду і віддачі теплоти; *б, д* – зміна температури повітря, що нагрівається в каналі  $T_{в\_ск}$  теплоакуюючих елементів з каналами прямокутного перетину й з каналами круглого перетину відповідно в нижній і верхній зонах в режимах заряду і віддачі теплоти; *в, е* – зміна температури теплової ізоляції  $T_{из}$  в нижній і верхній зонах, температури на поверхні корпусу  $T_{с1}$  і нагрітого повітря на виході з ЕТА  $T_{вих}$ ; індекс м – магнезит, індекс ш – шамот, індекс в – верхня зона ЕТА, індекс н – нижня зона ЕТА.

Абсолютна похибка вимірювань в діапазоні 50-650 °C для термопарі ХК становить 13-16,5 °C, а для термопарі ХА абсолютна похибка в тому ж діапазоні становить 18-20 °C.

Для зіставлення результатів розрахункових та експериментальних досліджень були взяті результати чисельного моделювання теплообмінних процесів в

теплоакумуючому елементі ЕТА з шамоту з каналами круглої форми та магнезиту із щілиноподібними каналами і значення температур стінки повітряного каналу, отримані в результаті експериментальних досліджень  $T_{ск2\_н}$  і  $T_{ск2\_в}$ . Отримано збіжність результатів у межах інженерної похибки (не більше 15 %).

У четвертому розділі проведено аналіз отриманих експериментальних даних про розподіл температур в теплоакумуючих елементах з шамоту і магнезиту в режимах заряду й віддачі теплоти. Визначено теплові характеристики, а також ефективність акумулювання і віддачі теплоти ЕТА з магнезитовими і шамотними теплоакумуючими елементами.

Визначена віддача теплоти  $Q_{вт}$  шляхом природної конвекції і випромінювання в режимах заряду і віддачі теплоти від поверхні корпусу ЕТА з теплоакумуючими елементами з шамоту і магнезиту, використовуючи значення температури  $T_{c1}$  (рис. 8 в, е), а також отримані середні коефіцієнти тепловіддачі  $\alpha_{з\_ср}$ . Середній коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_{з\_ср}$  від поверхні корпусу ЕТА з теплоакумуючими елементами з магнезиту змінюється в залежності від температури  $T_{c1}$  від 3,5 до 7 Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Для ЕТА з теплоакумуючими елементами з шамоту  $\alpha_{з\_ср}$  становить 3-6 Вт/(м<sup>2</sup>·°С). На основі отриманих даних про зміну температури стінки каналу теплоакумуючого елемента  $T_{ск1}$  і  $T_{ск2}$  (рис. 8 а, з) і температури повітря, що нагрівається в каналах теплоакумуючих елементів  $T_{в\_ск1}$  і  $T_{в\_ск2}$  (рис. 8 б, д) в режимах заряду і віддачі теплоти розраховані середні значення коефіцієнтів тепловіддачі в повітряних каналах теплоакумуючих елементів з шамоту і магнезиту  $\alpha_{к\_ест\_ср}$  і  $\alpha_{к\_ср}$  при природній та вимушеній конвекції (рис. 9).

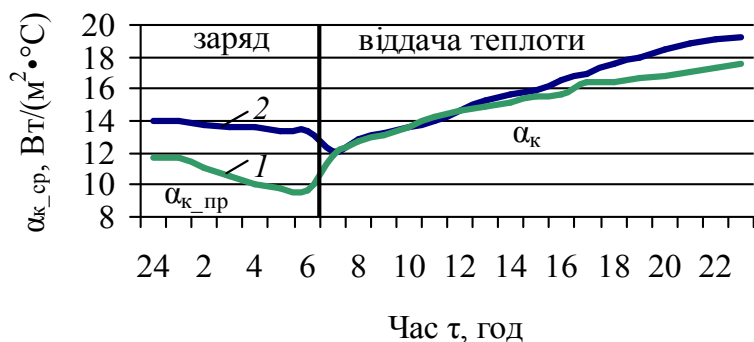


Рис. 9. Зміна середніх коефіцієнтів тепловіддачі  $\alpha_{к\_ест\_ср}$  і  $\alpha_{к\_ср}$  в каналах теплоакумуючих елементів з магнезиту і шамоту в режимах заряду та віддачі теплоти ЕТА: 1 – теплоакумуючі елементи з магнезиту; 2 – теплоакумуючі елементи з шамоту

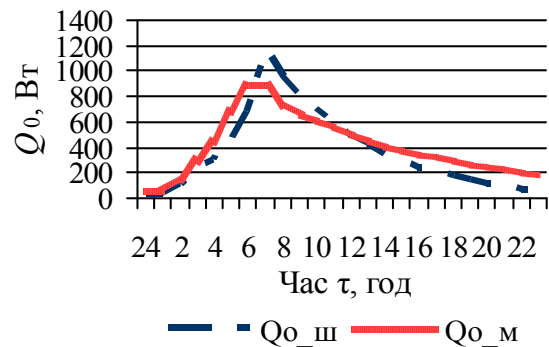
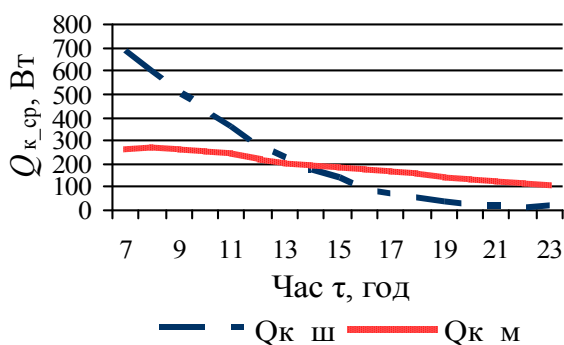


Рис. 10. Зміна середньої віддачі теплоти  $Q_{к\_ср}$  (а) в повітряних каналах теплоакумуючих елементів з шамоту і магнезиту та загальної віддачі теплоти  $Q_0$  (б) з урахуванням теплових втрат від поверхні корпусу ЕТА: індекс ш - шамот, індекс м - магнезит

Визначено середню віддачу теплоти в повітряних каналах теплоакумуючих елементів з шамоту і магнезиту  $Q_{к_ср}$  та загальну віддачу теплоти  $Q_0$  ЕТА (рис. 10).

Теплоакумуючі елементи з шамоту з каналами круглого перетину забезпечують сумарно більшу віддачу теплоти в каналах  $Q_{к_ш}$  (на 15 %) порівняно з магнезитовими теплоакумуючими елементами, у яких спостерігається рівномірна, але досить низька віддача теплоти  $Q_{к_м}$  (рис. 10 а). Така ж динаміка спостерігається і з загальною віддачею теплоти  $Q_0$ , яка складається з  $Q_{к_ср}$  та  $Q_{вт}$  (рис. 10 б). Це пояснюється великим температурним напором між температурою стінки повітряного каналу і температурою повітря, що нагрівається в каналі в теплоакумуючих елементах з шамоту, що і визначає більше значення віддачі теплоти в каналі в порівнянні з магнезитовими елементами.

Середньологарифмічний температурний напір в безрозмірній формі визначається відношенням поточного значення середньологарифмічного температурного напору в певний момент часу  $\tau$  до максимально можливого його значенням  $\Delta T_{лог \tau} / \Delta T_{лог max}$ . При цьому  $\Delta T_{лог}$  визначається як

$$\Delta T_{лог} = \frac{\Delta T' - \Delta T''}{\ln \frac{\Delta T'}{\Delta T''}}, \quad (2)$$

де  $\Delta T'$  і  $\Delta T''$  – температурні напори між температурою стінки каналу  $T_{ск}$  і температурою повітря, що нагрівається в каналі теплоакумуючого елемента  $T_{в_ск}$  в нижньому і верхньому перетинах повітряного каналу.

Відзначимо, що середньологарифмічний температурний напір в повітряних каналах теплоакумуючих елементів з шамоту більше на 50-150 °С протягом 7 годин режиму заряду ЕТА і перших 3-х годин режиму віддачі теплоти ЕТА в порівнянні з температурним напором в прямокутних каналах теплоакумуючих елементів з магнезиту, що відбивається на більш високому значенні віддачі теплоти в каналі  $Q_{к_ш}$  (рис. 11 а).

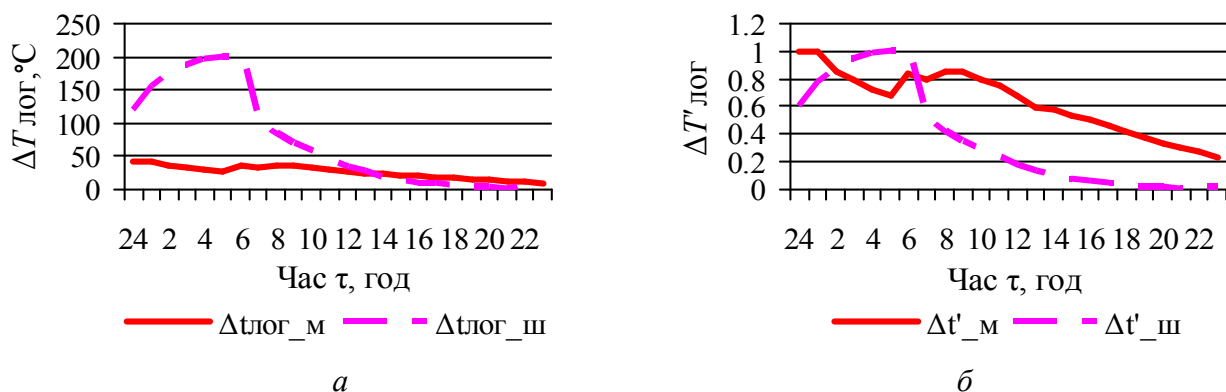


Рис. 11. Зміна середньологарифмічного температурного напору в каналах теплоакумуючих елементів з магнезиту і шамоту в абсолютних (а) і відносних величинах (б) протягом періоду заряду і віддачі теплоти ЕТА: індекс ш - шамот, індекс м - магнезит

На основі отриманих експериментальних даних про зміну температури  $T_{ск}$  (рис. 8 а, з) визначено кількість акумульованої теплоти в теплоакумуючих

елементах з магнезиту і шамоту в безрозмірній формі, яке визначається відношенням поточної акумульованої теплоти в певний момент часу  $\tau$  до максимально можливого його значення в кінці режиму заряду ЕТА  $Q_{\tau}/Q_{\max}$ . Результати наведені на рис. 12.

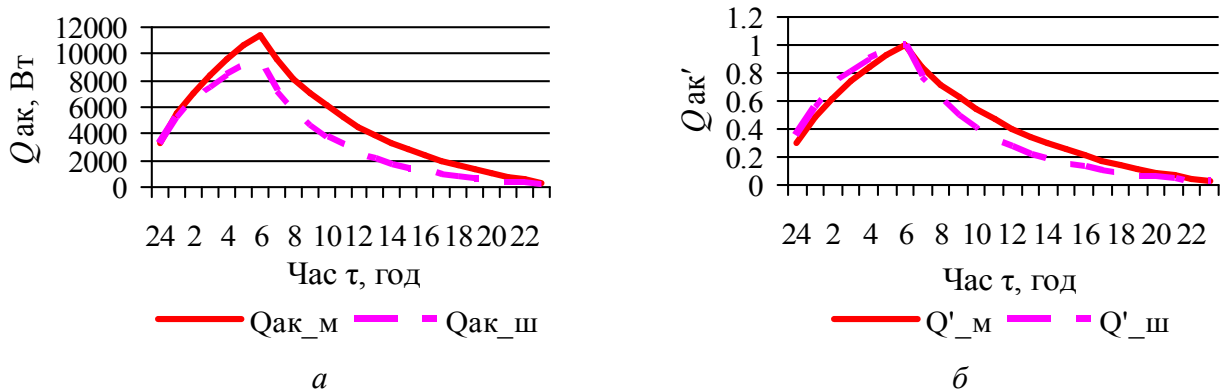


Рис. 12. Зміна кількості акумульованої теплоти в абсолютних (а) і відносних (б) величинах в режимах заряду і віддачі теплоти ЕТА: індекс ш - шамот, індекс м - магнезит

Розраховані середні значення темпу охолодження теплоакумулюючих елементів з магнезиту і шамоту на основі отриманих експериментальних даних  $m_m = 9,28 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$  і  $m_{ш} = 1,56 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$  підтверджують динаміку зміни температури теплоакумулюючих елементів з магнезиту і шамоту в режимі віддачі теплоти ЕТА (рис. 8 а, з).

Отримано аналітичні вирази для визначення надлишкової температури теплоакумулюючих елементів з магнезиту (3) і шамоту (4) з урахуванням їх темпу охолодження в режимі віддачі теплоти ЕТА шляхом апроксимації отриманих значень темпу охолодження методом найменших квадратів з використанням експоненціальної функції.

$$\vartheta_m = 54,401e^{-0,0823\tau}, \quad (3)$$

$$\vartheta_{ш} = 178,59e^{-0,2957\tau}. \quad (4)$$

Ефективність роботи ЕТА можна визначити з відношення

$$k_{\text{еф}} = \frac{Q_0}{Q_{\text{ак}}}. \quad (5)$$

Ефективність роботи ЕТА зі стандартними теплоакумулюючими елементами з магнезиту з щілиноподібними каналами, розрахована за формулою (5), становить 0,85, а ефективність ЕТА з шамотними елементами і круглими каналами становить 0,94.

Проведений техніко-економічний аналіз показав доцільність та перспективність застосування електроенергії для систем опалення з акумулюючим ефектом. Частка теплоакумулюючих елементів в кінцевій вартості ЕТА становить не більше 20 %. При використанні шамоту в якості матеріалу для теплоакумулюючих елементів ЕТА можливо скоротити витрати на їх виготовлення в 3 рази. Таким чином, можна зменшити кінцеву вартість ЕТА мінімум на 15 % в порівнянні з



існуючим українським аналогом, де використовуються магнезіальні теплоакumuлюючі елементи.

Розрахована економія витрат на споживання електроенергії при роботі ЕТА запропонованої конструкції з шамотними теплоакumuлюючими елементами потужністю 2,4 кВт з багатозонним електролічильником (2-х або 3-х зонним) за опалювальний сезон і термін його окупності в порівнянні з електричним панельним конвектором українського виробництва потужністю 2,5 кВт за умови, що останній працює 16 годин на добу. Термін окупності ЕТА становить від 0,9 до 1,0 опалювального сезону при тарифі на електроенергію 1,68 грн/кВт·год.

У табл. 1 наведені основні теплові характеристики ЕТА при роботі з теплоакumuлюючими елементами з магнезиту та шамоту.

Таблиця 1

Теплові характеристики ЕТА з теплоакumuлюючими елементами з магнезиту і шамоту

Матеріал	$\alpha_{к\_пр\_ср}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)	$\alpha_{к\_ср}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)	$Q_{o\_ср}$ , Вт	$Q_{o\_max}$ , Вт	$Q_{ак\_max}$ , Вт	$m_{ср}$ , с <sup>-1</sup>	$T_{ск\_min}$ , °С	$T_{ск\_max}$ , °С	$T_{cl\_min}$ , °С	$T_{cl\_max}$ , °С
Шамот	13,7	16,0	378	1166	9300	$1,56 \cdot 10^{-4}$	35	603	23	62
Магнезит	10,6	15,3	418	885	11300	$9,28 \cdot 10^{-5}$	60	644	25	72

Запропонована методика теплотехнічного розрахунку ЕТА, в якій використовуються отримані експериментальні дані і розраховані теплові характеристики ЕТА, представлені в таблиці 1, та розроблена блок-схема послідовності проведення теплотехнічного розрахунку ЕТА. Метою теплотехнічного розрахунку ЕТА є визначення необхідної потужності ТЕН, товщини теплової ізоляції  $\delta_{із}$ , кількості акумульованої теплоти  $Q_{ак}$  та загальної віддачі теплоти  $Q_0$  ЕТА, а також розрахунок темпу нагріву і охолодження теплоакumuлюючих елементів в режимах заряду і віддачі теплоти ЕТА.

У *додатках* наведені акти використання наукових результатів, а також розрахунок нестационарного температурного поля теплоакumuлюючого елемента з шамоту з каналами круглої форми в режимах заряду і віддачі теплоти ЕТА.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі комплексного теоретичного та експериментального дослідження теплообмінних процесів у твердих теплоакumuлюючих елементах електротеплового акумулятора вирішено наукове завдання щодо підвищення ефективності роботи твердотільних електротеплових акумуляторів шляхом удосконалення їх динамічних характеристик в режимах заряду і віддачі теплоти; запропоновано нове технічне рішення ЕТА з поліпшеними динамічними та економічними характеристиками, що дозволило науково обґрунтувати перспективність і доцільність його застосування як системи електротеплоакumuляційного опалення.

Відповідно до поставлених мети та завдань дослідження одержано такі наукові та практичні результати:

1. Сформована та адаптована математична модель теплообмінних процесів, що протікають в ЕТА в режимах заряду і віддачі теплоти. Для оцінки впливу геометричної форми повітряного каналу на розподіл температури в теплоакумулюючих елементах ЕТА проведено розрахунок нестационарного температурного поля теплоакумулюючого елемента заданих розмірів з декількома варіантами геометричних форм і розмірів повітряного каналу шляхом вирішення двомірної прямої нестационарної задачі теплопровідності методом кінцевих елементів.

2. В результаті проведення розрахункових досліджень отримано розподіл температурних полів в теплоакумулюючих елементах з магнезиту із щілиноподібними каналами і шамоту з каналами круглого перетину, а також зміну температури  $T_{ск}$  стінки повітряних каналів теплоакумулюючих елементів в режимах заряду і віддачі теплоти ЕТА. Визначено, що обрана схема теплоакумулюючого елемента з шамоту і каналами круглої форми дозволяє підвищити динаміку заряду, що відображає температура  $T_{ск}$  в кінці періоду заряду, і динаміку віддачі теплоти ЕТА від стінки повітряного каналу до потоку повітря, що нагрівається, в порівнянні зі стандартним елементом з прямокутними каналами.

3. Результати серії експериментальних досліджень динамічних характеристик теплоакумулюючих елементів ЕТА з шамоту і каналами круглого перетину показали, що збільшення темпу нагріву теплоакумулюючих елементів з шамоту забезпечувалось при використанні сталевих пластин товщиною 2 мм, які уклалися між теплоакумулюючими елементами ЕТА, це дало приріст температури протягом періоду заряду близько 10 % (50 °C) в порівнянні з варіантом, коли металеві пластини не використовувалися.

4. Запропонована конструкція ЕТА з шамотними теплоакумулюючими елементами із каналами круглого перетину забезпечує більшу віддачу теплоти  $Q_{к-ср}$  при використанні більш дешевого теплоакумулюючого матеріалу в порівнянні зі стандартною конструкцією ЕТА з теплоакумулюючими елементами з магнезиту і щілиноподібними каналами. Це пояснюється більш рівномірним розподілом температури в теплоакумулюючих елементах, формою повітряних каналів, а також більшим температурним напором між температурою стінки каналу  $T_{ск}$  і температурою повітря, що нагрівається в каналі  $T_{в-ск}$ , ніж в повітряних каналах теплоакумулюючих елементів з магнезиту. Зазначені особливості динаміки нагріву і охолодження теплоакумулюючих елементів простежуються і в результатах розрахункових досліджень, які якісно узгоджуються з даними експериментальних досліджень в межах інженерної похибки (розбіжність не більше 15 %).

5. На основі аналізу і узагальнення отриманих експериментальних даних визначено теплові характеристики ЕТА та отримано значення загальної віддачі теплоти ЕТА  $Q_0$ , кількості акумульованої теплоти  $Q_{ак}$  ЕТА в абсолютних і відносних одиницях, а також середній темп охолодження  $m_m = 9,28 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$  і  $m_{ш} = 1,54 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$  теплоакумулюючих елементів з магнезиту і шамоту в режимі віддачі теплоти ЕТА. Отримані експериментальні дані та розраховані теплові характеристики ЕТА використано в запропонованій методиці теплотехнічного розрахунку ЕТА.

6. Для визначення надлишкової температури теплоакумулюючих елементів з шамоту і магнезиту з урахуванням їх темпу охолодження в режимі віддачі теплоти

ЕТА отримано аналітичні вирази, оцінена також ефективність роботи ЕТА зі стандартними теплоакмулюючими елементами з магнезиту з щілиноподібними каналами  $k_{\text{еф}} = 0,85$  і з шамотними елементами і круглими каналами  $k_{\text{еф}} = 0,94$ .

7. В результаті виконання техніко-економічного обґрунтування застосування ЕТА з шамотними теплоакмулюючими елементами встановлено, що термін окупності ЕТА в порівнянні з електричним панельним конвектором потужністю 2,5 кВт становить від 0,9 до 1,0 опалювального сезону при тарифі на електроенергію 1,68 грн/кВт·год.

8. Запропонована конструкція ЕТА з шамотними теплоакмулюючими елементами і каналами круглої форми з поліпшеними динамічними характеристиками дозволяє збільшити на 15 % віддачу теплоти в каналах теплоакмулюючих елементів і знизити кінцеву вартість ЕТА мінімум на 15 % в порівнянні з існуючими аналогами, що підтверджується актом використання наукових результатів в ІВЕ НАН України.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Мацевитый Ю.М. Оценка энергетической эффективности систем электротеплоаккумуляционного отопления административных зданий / Ю.М. Мацевитый, Н.Г. Ганжа, А.В. Хищенко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2011. – №10. – С. 9-16. – ISSN 2218-1849.

2. Ганжа Н.Г. Тепловое аккумулярование как способ повышения энергетической эффективности систем теплоснабжения / Н.Г. Ганжа, А.В. Хищенко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. – №3. – С. 16-21. – ISSN 2218-1849.

3. Тарасова В.А. Выбор рациональных геометрических параметров элемента электрического теплового аккумулятора / В.А. Тарасова, А.В. Хищенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – №13 (987). – С. 110-115. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2078-774X.

4. Хищенко А.В. Исследование режимов работы электрического теплового аккумулятора / А.В. Хищенко, В.А. Тарасова // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2013. – №2. – С. 136-139. – ISSN 2078-5364.

5. Хищенко А.В. Оценка и анализ тепловых параметров твердых теплоаккумулярующих элементов в режиме заряда и отдачи тепла электрического теплового аккумулятора / А.В. Хищенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – №13 (1056). – С. 156-161. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2078-774X.

6. Хищенко А.В. Расчетное и экспериментальное исследование тепловых процессов в твердом теплоаккумулярующем материале с высокими теплоаккумулярующими свойствами / А.В. Хищенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – №10 (1182). – С. 44-49. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-774X. – doi:10.20998/2078-774X.2016.10.06.

7. Хименко А.В. Исследование динамических характеристик электротепловых аккумуляторов / А.В. Хименко // Відновлювальна енергетика. – 2016. – №2 (45). – С. 22-26. – ISSN 1819-8058.

8. Хіменко О.В. Оцінка ефективності акумулювання теплоти твердими теплоакumuлюючими елементами електротеплового акумулятора / О. В. Хіменко // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Теорія і практика будівництва. – Л.: НУ "Львівська політехніка", 2016. – №844. – С.210-215. – ISSN 0321-0499.

9. Хименко А.В. Повышение энергетической эффективности систем теплоснабжения за счет использования высокодинамичных тепловых аккумуляторов /А.В. Хименко // Строительная теплофизика и инженерные методы снижения энергопотребления зданий: тезисы доклада 1-ой Научно-технической конференции – с. Соколовка, Козелецкого района, Черниговской области, 5-8 сентября 2011 г. – С. 59-63.

10. Хименко А.В. Расчет нестационарного температурного поля теплоаккумулирующего элемента электрического теплового аккумулятора / А.В. Хименко // Инновационные пути модернизации базовых отраслей промышленности, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей среды: тезисы доклада II Межотраслевой научно-практической конференции молодых ученых и специалистов в области проектирования предприятий горно-металлургического комплекса, энерго- и ресурсосбережения, защиты окружающей среды – г. Харьков, 27-28 марта 2013 г. – С. 49-53.

11. Хименко А.В. Эффективность применения теплоаккумулирующих материалов в электрических тепловых аккумуляторах / А.В. Хименко // Стратегия качества в промышленности и образовании: тезисы доклада IX Международной научно-практической конференции, Болгария, 31 мая – 7 июня. – Варна, 2013. – С. 219-223.

12. Хименко А.В. Оценка и анализ эффективности аккумулирования теплоты в твердых материалах с высокими теплоаккумулирующими свойствами / А.В. Хименко // Актуальні проблеми систем теплогазопостачання і вентиляції, водопостачання і водовідведення: тези доповіді Міжнародної науково-технічної конференції – м. Рівне, 11-13 березня 2015 р. – С. 182-184.

13. Хименко А.В. Экспериментальное исследование тепловых процессов в твердых теплоаккумулирующих материалах / А.В. Хименко // Відновлювальна енергетика та енергоефективність у ХХІ столітті: тези доповіді XVI Міжнародної науково-практичної конференції – м. Київ, НТУУ «КПІ», 28-29 травня 2015 р. – С. 159-161.

## АНОТАЦІЇ

Хіменко О. В. Підвищення ефективності роботи твердотільних електротеплових акумуляторів шляхом удосконалення їх динамічних характеристик. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06. – технічна теплофізика і промислова теплоенергетика. –

Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, м. Харків, 2017 р.

У дисертаційній роботі представлено дослідження теплообмінних процесів у твердих теплоакумуючих елементах електротеплового акумулятора для підвищення його динамічних характеристик в режимах заряду і віддачі теплоти.

Сформовано математичну модель теплообмінних процесів, адаптовану до режимів роботи ЕТА, адекватність якої експериментально підтверджена.

Проведено чисельне моделювання теплового стану теплоакумуючих елементів з магнезиту із каналами прямокутної форми і шамоту з каналами круглої форми. Експериментально досліджено динамічні характеристики теплоакумуючих елементів в режимах заряду і віддачі теплоти ЕТА. На основі аналізу та узагальнення отриманих експериментальних даних визначено теплові характеристики ЕТА з теплоакумуючими елементами з магнезиту і шамоту, а також ефективність роботи ЕТА в режимах заряду і віддачі теплоти. Запропоновано методикау теплотехнічного розрахунку ЕТА, в якій враховані теплові характеристики ЕТА в режимах заряду і віддачі теплоти, отримані в результаті обробки експериментальних даних.

На основі результатів досліджень запропоновано нове технічне рішення твердотілого електротеплового акумулятора з поліпшеними динамічними характеристиками для застосування у якості системи електротеплоаккумуляційного опалення.

**Ключові слова:** електротепловий акумулятор, теплоакумуючий матеріал, режими заряду і віддачі теплоти, темп нагріву і охолодження, шамот, магнезит, коефіцієнт тепловіддачі, температурний напір, теплові характеристики, розподіл температур.

Хименко А.В. Повышение эффективности работы твердотельных электротепловых аккумуляторов путем совершенствования их динамических характеристик. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06. – техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. – Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков, 2017 г.

Сформирована и адаптирована математическая модель теплообменных процессов, протекающих в ЭТА в режимах заряда и отдачи теплоты, для стандартного теплоаккумулирующего элемента с каналами щелевидной формы, а также для элементов с каналами круглой формы.

Получено распределение температурных полей в теплоаккумулирующих элементах из магнезита со щелевидными каналами и шамота с каналами круглого сечения, а также изменение температуры стенки воздушных каналов теплоаккумулирующих элементов в режимах заряда и отдачи теплоты ЭТА.

Была проведена серия экспериментальных исследований динамических характеристик теплоаккумулирующих элементов ЭТА из магнезита со щелевидными воздушными каналами, а также из шамота с каналами круглого. По результатам проведенных экспериментальных исследований сделан вывод о более

эффективной работе ЭТА предложенной конструкции с теплоаккумулирующими элементами из шамота и каналами круглого сечения, которая обеспечивает бóльшую отдачу теплоты при использовании более дешевого теплоаккумулирующего материала по сравнению со стандартной конструкцией ЭТА с теплоаккумулирующими элементами из магнезита и щелевидными каналами.

На основе анализа и обобщения полученных экспериментальных данных определены тепловые характеристики ЭТА с теплоаккумулирующими элементами из магнезита и шамота, а также эффективность работы ЭТА в режимах заряда и отдачи теплоты.

Получены аналитические выражения для определения избыточной температуры теплоаккумулирующих элементов из шамота и магнезита с учетом их темпа охлаждения в режиме отдачи теплоты ЭТА.

Предложена конструкция ЭТА с теплоаккумулирующими элементами из шамота и каналами круглой формы с улучшенными динамическими характеристиками, которая позволяет увеличить минимум на 15 % отдачу теплоты в каналах теплоаккумулирующих элементов и снизить конечную стоимость ЭТА на 15 % по сравнению с существующими аналогами, что подтверждается актом использования научных результатов в ИВЭ НАН Украины. Также результаты диссертационной работы используются в учебном процессе на кафедре возобновляемых источников энергии Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт" им. Игоря Сикорского.

**Ключевые слова:** электротепловой аккумулятор, теплоаккумулирующий материал, режимы заряда и отдачи теплоты, темп нагрева и охлаждения, шамот, магнезит, коэффициент теплоотдачи, температурный напор, тепловые характеристики, распределение температур.

Khimenko A. V. Enhancement the efficiency of solid electric thermal storages by improving their dynamic performance. – As a manuscript.

Thesis for the scientific degree of the Candidate of Technical Sciences by speciality 05.14.06 – technical thermal physics and industrial heat power engineering. – The A. M. Pidgorny Institute for Mechanical Engineering Problems National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkov, 2017.

In the thesis presents a study of heat transfer processes in the solid heat storage elements of electric-thermal storage for increasing its dynamic characteristics in the charge and the heat output modes.

Generated a mathematical model of heat transfer processes, adapted to the modes of ETS, the adequacy of which is confirmed experimentally.

Numerical simulation of the thermal state of heat storage elements from the magnesite with channels of rectangular shape and the chamotte with channels of round shape. Experimentally studied the dynamic characteristics of heat storage elements in the charge mode and the heat output mode of ETS. On the basis of analysis and generalization of obtained experimental data, the thermal characteristics of ETS heat storage elements from the magnesite, and chamotte, as well as the efficiency of the charge mode and the heat output mode. The proposed methodology of thermal calculation of ETS, which takes

into account the thermal performance of the charge mode and the heat output mode resulting from the processing of experimental data.

Based on the results of the studies proposed new technical solution efficient solid-state electric thermal storage with improved dynamic characteristics for use as a electric thermal storage heating systems.

**Key words:** electric thermal storage, heat storage material, the charge and the heat output mode, rate of heating and cooling, chamotte, magnesite, heat transfer coefficient, temperature difference, thermal performance, the temperature distribution.

Підписано до друку 17.02.2017 р. Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Папір офсетний.  
Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 0,9. Наклад 100 прим. Зам. № 1527

---

Друк: «Карат ЛТД», 03194, м. Київ, вул. Литвиненко-Вольгемут, 2-а.  
Тел.: +380 (44) 229-11-40, (050) 355-72-92, e-mail: karat@karat.in.ua  
Свідоцтво ДК № 163 від 01.09.2000 р.