

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ШРАМЕНКО Олександр Миколайович

УДК 697.278

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ТА РЕЖИМІВ РОБОТИ АКУМУЛЯТОРІВ  
ТЕПЛОТИ НА ОСНОВІ ТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ

05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі теплових електричних станцій та енергозберігаючих технологій Одеського національного політехнічного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент  
**Климчук Олександр Андрійович**,  
Одеський національний політехнічний університет,  
доцент кафедри теплових електричних станцій та енергозберігаючих технологій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Дорошенко Олександр Вікторович**,  
Одеська національна академія харчових технологій,  
професор кафедри технічної термодинаміки.

кандидат технічних наук, доцент  
**Новаківський Євген Валерійович**,  
Національний технічний університет «Київський  
політехнічний інститут», доцент кафедри атомної  
енергетики та ядерної теплофізики.

Захист відбудеться «13» січня 2017 р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.052.04 в Одеському національному політехнічному університеті за адресою: 65044, м. Одеса, проспект Шевченка, 1.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеського національного політехнічного університету за адресою: 65044, м. Одеса, проспект Шевченка, 1.

Автореферат розісланий «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
Вченої ради, д.т.н., проф.

Г.А. Баласянян

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Розвиток енергетики має вирішальний вплив на стан економіки в державі та рівень життя населення. Економія первинних енергоресурсів та розширення можливості використання нетрадиційних джерел енергії є об'єктивно обумовленою необхідністю. Для України ці проблеми мають загальнодержавне значення.

Станом на початок 2014 р. 82% блоків теплових електростанцій і теплоелектроцентралей перевищили межу фізичного зношення у 200 тис. годин наробітку й потребують модернізації або заміни. Атомні блоки наближаються до закінчення строку проектної експлуатації: понад 70% атомних блоків потребуватимуть подовження строку експлуатації у найближчі 10 років. До того ж баланс потужності енергосистеми України характеризується дефіцитом як маневрених, так і регулюючих потужностей.

Для зниження потреби в будівництві генеруючих потужностей необхідно стимулювати не тільки збереження електроенергії, але й вирівнювання графіка навантаження. Для цього потрібне посилення диференційованості тарифів на електроенергію для кінцевого споживача за часом доби й стимулювання зниження споживання електроенергії в піковий час за рахунок перенесення споживання на інший час доби.

Однак пряме використання електроенергії в нічний час доби не дозволяє значною мірою вирішити питання вирівнювання енергоспоживання на протязі доби, інша справа якщо перенести добове споживання енергії на нічний період. Це можна вирішити за рахунок акумулювання енергії. Проте, акумулювання електричної енергії вимагає значних капіталовкладень і експлуатаційних витрат. Іншим напрямком вирішення даного питання може бути використання електроенергії ( за нічним тарифом ) для потреб теплопостачання будинку за рахунок використання акумуляторів теплоти. У відмінності від електричних акумуляторів - теплові мають набагато більший термін служби.

Крім розповсюджених зараз водяних акумуляторів тепла, існують також акумулятори на основі твердих матеріалів. Застосування твердих матеріалів дозволяє зменшити розміри акумулятора тепла за рахунок більшої щільності та більшого діапазону робочих температур.

Таким чином, дослідження, спрямовані на підвищення ефективності роботи акумуляторів теплоти на основі твердих матеріалів в системах теплопостачання будівель, є актуальними і відповідають сучасним тенденціям розвитку теплоенергетики.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основні теоретичні і практичні результати дисертаційної роботи одержані при виконанні НДР у відповідності Закону України "Про енергозбереження", пріоритетним напрямком розвитку науки і техніки в Україні «Екологічно чиста енергетика та енергозберігаючі технології» за пріоритетним напрямком "Енергетичної стратегії України на період до 2030 року", а також у межах НДР №33-41 (0111U006721) "Ефективні технології генерації та споживання енергоресурсів». Етап 3.

"Економічна та екологічна ефективність інтегрованих систем енергозабезпечення за міжнародними стандартами" (2013–2014 рр.). Зміст і тематика роботи відповідають задачам державної програми «TASIS» Енергетичного Центру ЄС в Україні, що визначає актуальність теми.

**Мета роботи** - підвищення ефективності роботи акумуляторів теплоти на основі твердих матеріалів в системах теплопостачання поромислових та громадських будівель.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано наступні задачі:

1. Виконати аналіз сучасних способів акумулювання теплоти та теплоакумулюючих матеріалів для визначення найбільш придатних з них для використання в системах теплопостачання будівель.

2. Виконати теоретичне дослідження характеру розподілу температур в акумулюючій насадці в процесі зарядки та розробити методику розрахунку процесу нагріву твердих матеріалів зсередини при граничних умовах другого роду.

3. Виконати експериментальне дослідження процесів зарядки та розрядки акумулятора теплоти в умовах експлуатації.

4. Розробити методику визначення конструктивних параметрів акумулюючої насадки в залежності від умов роботи акумулятора теплоти та режимів роботи системи теплопостачання будівлі.

**Об'єкт дослідження** – акумулятор тепла на основі твердих матеріалів.

**Предмет дослідження** – Процес теплообміну в акумулюючій насадці та режими роботи акумулятора тепла.

**Методи дослідження.** Поставлені завдання вирішувалися математичними методами фізичного та чисельного моделювання. Фізичне моделювання використовувалося для отримання даних, які дозволяють застосовувати теорію регулярного теплового режиму для розрахунку динаміки нагріву акумулюючої насадки в реальних умовах. Чисельне моделювання використовувалося для отримання методики теплового розрахунку процесу нагріву твердих матеріалів зсередини при граничних умовах другого роду (сталий тепловий потік).

**Достовірність отриманих наукових положень, висновків і рекомендацій** базується на сучасних уявленнях про теплообмін в нестационарному режимі та підтверджена тим, що отримані результати не суперечать висновкам відомих положень. Наукові положення, висновки і рекомендації, сформульовані в дисертаційній роботі, підтверджені результатами експериментальних досліджень, узагальненням і систематизацією отриманих даних.

**Наукова новизна роботи:**

1. Вперше запропоновано і обґрунтовано методичний підхід до визначення конструктивних параметрів акумулятора теплоти, який, на відміну від існуючих, базується на врахуванні потреб та режимів роботи споживачів теплоти;

2. Удосконалено математичну модель динаміки нагріву твердих тіл зсередини сталим тепловим потоком, що дозволяє визначати зв'язок між конструктивними та тепловими параметрами акумуляторів теплоти на основі твердих матеріалів на стадії проектування.

3. Вперше отримане значення коефіцієнта усереднення теплового потоку для випадку нагріву твердого тіла зсередини при граничних умовах другого роду;

4. Набула подальшого розвитку теорія регулярного теплового режиму відносно процесів охолодження твердих тіл при конвективному теплообміні в каналах в середині твердого матеріалу та нагріву твердих тіл внутрішніми джерелами теплоти. На основі експериментальних даних отримане значення коефіцієнта форми для твердого тіла з каналами.

#### **Практичне значення одержаних результатів.**

1. Розроблена методика розрахунку нагріву твердих матеріалів при граничних умовах другого роду, яка, на відміну від існуючих, дозволяє описувати динаміку цього процесу при розташуванні нагрівальних елементів всередині матеріалу;

2. Розроблений алгоритм визначення конструктивних параметрів акумулятора теплоти на основі твердих матеріалів в залежності від потреб та режимів роботи споживача теплоти.

3. Удосконалена методика розрахунку нагріву та охолодження твердих тіл з використанням теорії регулярного режиму, завдяки чому вона була адаптована для випадків конвективного теплообміну всередині твердого тіла.

Результати кандидатської дисертації здобувача Шраменко О.М. передані для впровадження на ПП «Ізотерм-Еліт» про що є відповідний акт.

Результати проведених досліджень можуть бути застосовані при проектуванні комбінованих систем теплопостачання та розробці акумуляторів теплоти на основі твердих матеріалів. Також вони можуть бути застосовані в навчальному процесі при підготовці спеціалістів за напрямом «Теплоенергетика» і перепідготовці фахівців з питань енергоефективності.

#### **Особистий внесок здобувача полягає в:**

- Формуванні мети та постановці задач дослідження;
- Обґрунтуванні принципів та методів визначення оптимальних конструктивних параметрів акумуляторів теплоти на основі твердих матеріалів.

- Проведенні теоретичних та експериментальних досліджень нестационарного теплообміну в акумулюючій насадці в процесі зарядки та розрядки акумулятора теплоти ;

- Якісному та кількісному аналізу та інтерпретації отриманих результатів досліджень;

**Апробація основних результатів досліджень.** Основні теоретичні положення, результати та висновки дисертаційної роботи доповідались автором, обговорювались та отримали схвальні відгуки на: VI Всеукраїнській науково-практичній конференції «Охорона навколишнього середовища промислових регіонів як умова сталого розвитку України», ЗДІА, м. Запоріжжя (Україна), 9-10 грудня 2010 р; Міжнародній науково-практичній конференції «Екологічні проблеми Чорного моря» м.Одеса (Україна), 28-29 жовтня 2010 р.; IX Міжнародній науково-практичній конференції «Геометричне та комп'ютерне моделювання: енергозбереження, екологія, дизайн», НАПКБ, м.Сімферополь, 24-28 серпня 2012 року; I Міжнародній науково-технічній конференції «Енергоефективність в галузях економіки України» ВНТУ, м.Віниця, 23-25 листопада 2011 р.; IX Міжнародній

науково-технічній конференції «Проблеми енергосбереження та шляхи їх вирішення», НТУ «ХПІ», м. Харків, 24-25 квітня 2013 р.; II Міжнародній науково-технічній конференції «Енергоефективність в галузях економіки України», ВНТУ, м.Віниця, 19-21 листопада 2013 р; III Міжнародній науково-технічній конференції «Енергоефективність в галузях економіки України ВНТУ, м.Віниця, 17-19 листопада 2015 р.; Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених, аспірантів та студентів, ОНАХТ, м.Одеса, 21 квітня 2015 р.

**За темою дисертації** опубліковано 12 статей у наукових журналах, з них: 5 у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у журналах, які входять до наукометричних баз даних; 2 тез доповідей на конференціях.

### **Обсяг та структура дисертації.**

Повний обсяг дисертації – 149 сторінок і складається з вступу, чотирьох основних розділів, загальних висновків, списку використаної літератури з 122 найменувань. Основна частина викладена на 108 сторінок основного тексту, 55 рисунків, 12 таблиць.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми, показано її наукову новизну і практичну цінність, сформульовано мету і завдання дослідження, показано зв'язок з науковими програмами і планами.

**Перший розділ** присвячений вивченню сучасного стану систем теплопостачання будівель з акумуляторами теплоти.

На підставі робіт Бекмана Г., Гіллі П, Левенберга В.Д., Гольстрема В.А. проведено аналіз сучасних способів та схем акумулявання теплоти та матеріалів, що використовуються для цих потреб. На основі результатів аналізу було показано, що в системах теплопостачання будівель доцільним є використання акумуляторів теплоти об'ємного типу на основі рідких та твердих матеріалів. Серед рідких акумуляючих матеріалів найчастіше використовують воду завдяки її теплофізичним властивостям та доступності. Використання твердих матеріалів дозволяє в значній мірі зменшити об'єм акумулятора теплоти за рахунок високих робочих температур та простоті конструкції, також при невеликій потужності акумулятора є можливість використовувати його безпосередньо в приміщенні, що опалюється.

Для знаходження оптимальних конструктивних параметрів акумулятора теплоти необхідно мати методику розрахунку динаміки процесу зарядки та розрядки акумуляючої насадки. Тому на основі літературних джерел був проведений аналіз сучасних способів розрахунку нестационарної теплопроводності в твердих тілах. Розглянуті аналітичні (Карслоу Г.,Егер Д., Ликов А.В.) та наближені (Семікін І.Д., Вейнік А.І., Шмідт Є.) методи вирішення задач теплопроводності при граничних умовах другого роду в одно-, дво-, та тримірній постановці як основа для розробки математичної моделі теплообміну в акумуляючій насадці.

На основі результатів аналізу показано, що традиційні аналітичні методи розрахунків дозволяють отримувати рішення для процесів, які описуються лінійними диференціальними рівняннями для тих випадків, коли теплофізичні параметри можна вважати незалежними від температури. Такі методи вирішення задач нестационарної теплопроводності виявляються ефективними лише для тіл відносно простої форми. Проте і в цьому випадку рівняння, які дозволяють визначити зміну температури протягом часу мають вигляд подвійних чи потрійних експоненціальних рядів, збіжність яких суттєво залежить від координат обраної точкисередині тіла і тривалості процесу нагріву.

На практиці доцільно використовувати прості вихідні рівняння, навіть нехтуючи точністю рішення, бо досвід показує, що похибка в рішеннях у межах 5-10 %, як правило, не призводить до значних неточностей у розрахунках.

В якості основного був обраний спосіб розробки інженерної методики розрахунку, оснований на попередньому аналізі фізичної обстановки процесу та виключення з диференціальних рівнянь теплового балансу деяких аргументів.

**Другий розділ** присвячений розробці методики розрахунку нагріву твердих тіл в середині при граничних умовах другого роду (сталий тепловий потік на оповірхню).

Для опису розподілу температури в тілі був запропонований метод, який полягає в тому, що весь процес нагріву та охолодження тіла розбивається на дві стадії. Перша стадія відповідає проникненню теплоти в товщину тіла (так званий інерційний період), друга – зміні температури тіла по всьому об'єму одночасно.

В обох випадках дійсна крива розподілу температури в тілі заміняється на параболою n-го порядку. Вигляд рівняння параболі не залежить від напрямку теплового потоку, тобто від того, нагрівається чи охолоджується.

Встановлено, що згідно з принципом стабільності теплового потоку, форма поверхні нагріву впливає на розподілення температури в тілі лише поблизу цієї поверхні, а на достатній відстані від поверхні форма температурного поля буде залежати від напрямку поширення теплового потоку в тілі. Тобто, якщо тіло нагрівається зсередини через квадратну порожнину, то на певній відстані від нагрівача температурне поле буде циліндричним, так як має місце радіальне поширення теплоти (рис.1).

Для опису поля температур в циліндричному тілі запропоновано рівняння

$$t = t_0 + \Delta t \cdot \left(1 - \frac{x}{X}\right)^n \quad (1)$$

де  $X$  - товщина прогрітого шару матеріалу, м;  $x$  - координата точки, в якій визначається температура;  $\Delta t = t_n - t_0$  - перепад температур по товщині тіла, °С;

$t_0$  - початкова температура, °С;  $t_n$  - температура на поверхні тіла, °С.

Величина перепаду температур визначається наступним чином:

$$\Delta t = \frac{q_{ноє} \cdot X}{k \cdot \lambda} \quad (2)$$

де  $q_{нов}$  - тепловий потік на поверхню тіла, Вт/м<sup>2</sup>;  $k$  - коефіцієнт усереднення густини теплового потоку;  $\lambda$  - теплопровідність матеріалу, Вт/(м·К).

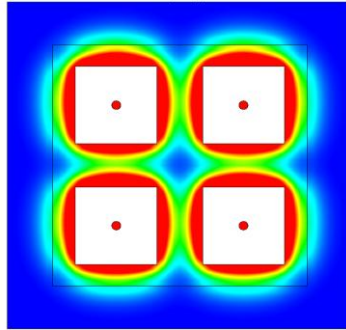


Рис. 1. Температурне поле в твердому тілі при нагріві зсередини.

Аналіз даних, отриманих за допомогою комп'ютерного моделювання, показав, що використання сучасних інженерних методик розрахунку процесів нагріву твердих тіл сталим тепловим потоком для випадків нагріву зсередини дає некоректні результати. В основному це пов'язане з тим, що значення коефіцієнта усереднення теплового потоку  $k$  відомі лише для випадку нагріву ззовні і не можуть бути використані для випадків нагріву тіл зсередини.

Для того, щоб знайти значення коефіцієнта усереднення теплового потоку при нагріванні зсередини та інші необхідні величини відповідно до рівнянь (1) та (2) (показник ступеня  $n$ , тривалість інерційного періоду, координату середньомасової температури в тілі та ін.) було проведено комп'ютерне моделювання нагріву циліндру, виконаного з матеріалу з відомими теплофізичними властивостями, сталим тепловим потоком зсередини (рис.2).

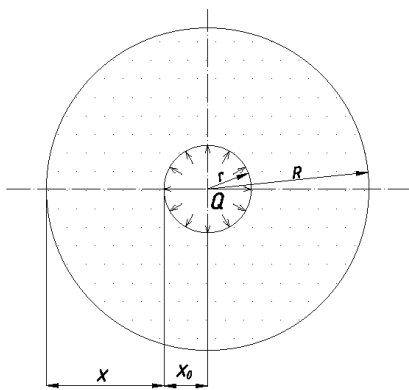


Рис. 2. Розрахункова схема

Матеріал циліндру – хромомангезит з

наступними теплофізичними

властивостями: питома теплоємність  $c = 1,08 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$ ; густина

$\rho = 2900 \text{ кг} / \text{м}^3$ ; коефіцієнт

теплопровідності  $\lambda = 2 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$ ;

зовнішній радіус циліндру змінювався та

складав  $R = 15; 20; 30; 50; 100 \text{ та } 150 \text{ мм}$ ;

радіус внутрішньої циліндричної

порожнини був сталим та дорівнював

$r = 5 \text{ мм}$

Моделювання проводилось для

випадків з різним питомим тепловим

потоком на поверхню:  $q_1 = 19108 \text{ Вт} / \text{м}^2$ ,  $q_2 = 31847 \text{ Вт} / \text{м}^2$ ,  $q_3 = 50955 \text{ Вт} / \text{м}^2$ .

За результатами моделювання були знайдені всі невідомі параметри згідно рівнянь (1) та (2):



1) Коефіцієнт усереднення теплового потоку розраховувався за допомогою формули  $k = \frac{q \cdot X}{\lambda \cdot \Delta t}$  по отриманих з моделювання значеннях перепаду температур  $\Delta t$ . В інтервалі  $4 \leq R/r < 30$  залежність  $k = f(R/r)$  має вигляд прямої лінії, що описується рівнянням:  $k = 0.262 \cdot R/r + 2$  (рис.3.).

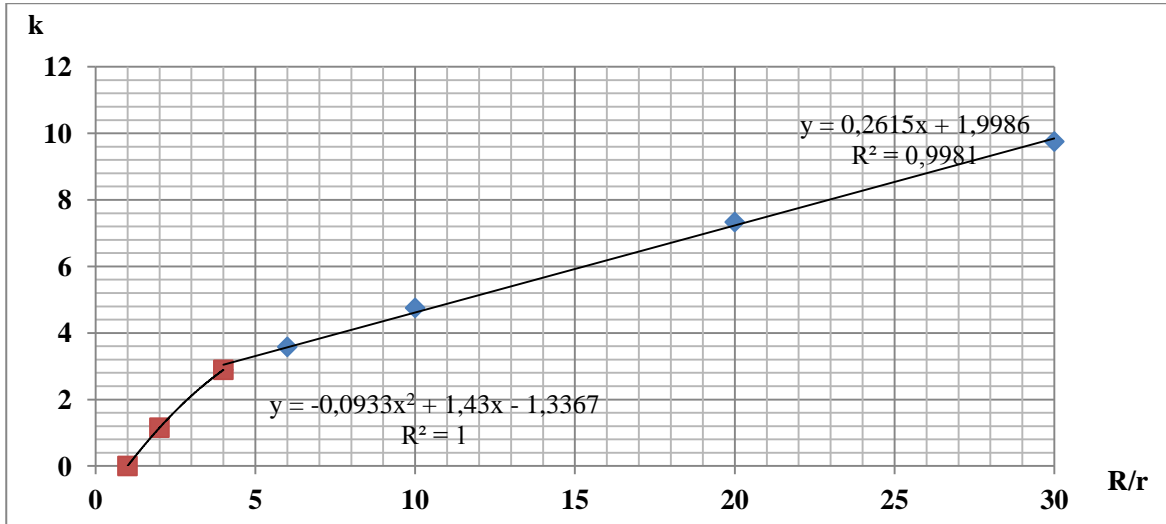


Рис.3. Графік залежності коефіцієнта усереднення теплового потоку від відносної товщини тіла

2) Показник степені  $n$  визначався за допомогою співвідношення

$$\varepsilon = \frac{1}{n+1} \cdot \frac{1 + \frac{1}{n+2} \Delta}{1 + \frac{1}{2} \Delta}$$

де  $\varepsilon = \frac{t_{cp} - t_0}{(t_n - t_0)}$  - відносна середня температура, що визначалась за допомогою моделювання,  $\Delta$  - відносна товщина прогріву  $\Delta = X / X_0$ .

Отримана залежність описується прямою  $n = 0,034\Delta + 2,8643$  (рис.4.)

3) Аналогічно, за результатами моделювання було отримане значення тривалість інерційного періоду  $Fo' = \frac{a \cdot \tau'}{X^2} = 0,111$  (3)

Розрахунковим шляхом знайдені наступні співвідношення:

1) формула розрахунку координати середньомасової температури

$$\bar{x} = X \cdot (1 - \sqrt[n]{\varepsilon}); \quad (4)$$

2) швидкість зміни температури тіла в часі при нагріванні сталим тепловим

потокком зсередини:  $T_m(\tau) = t_0 + \frac{2 \cdot q_{нов}}{X_0(\Delta^2 + 2\Delta) \cdot \rho \cdot c} \cdot \tau, \quad (5)$

3) *Еквівалентний радіус*  $R_e = \sqrt{\frac{F_{сеч}}{\pi \cdot n} + r^2}$  - зовнішній радіус такого циліндра, який нагрівається з тією ж швидкістю  $V$ , що і тіло довільної форми при кількості нагрівачів в тілі  $n$ .

4) *Температура нагрівального елемента*

$$T_1 = \sqrt[4]{\frac{q_{нов} \cdot r \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{r_n}{r} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \right)}{r_n \cdot \sigma_0}} + T_2^4 \quad (6)$$

де  $T_1, T_2$  - температура поверхні нагрівача та поверхні, що нагрівається, відповідно, К;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  - ступінь чорноти матеріалу нагрівача та матеріалу, що нагрівається.  $r_n, r$  - радіус нагрівача та циліндричної порожнини відповідно.

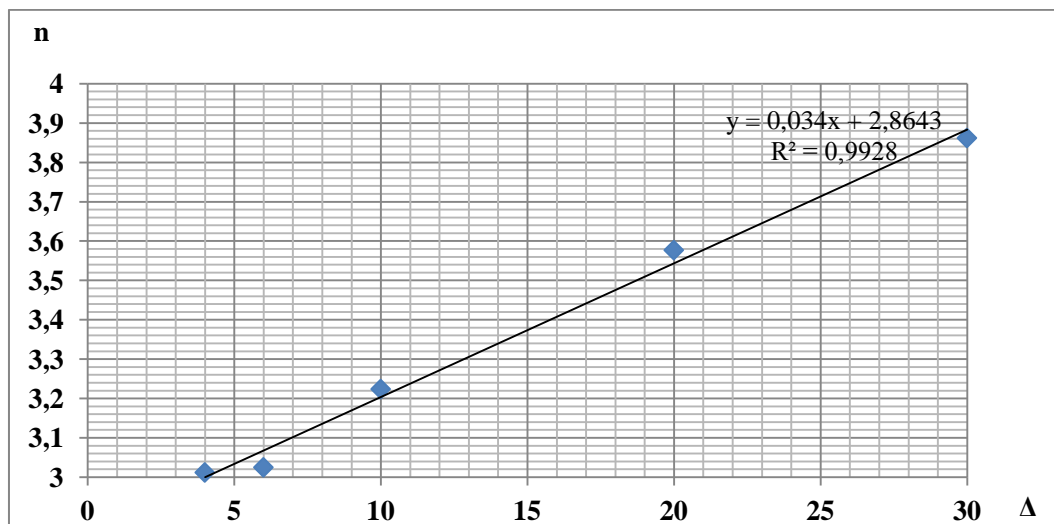


Рис.4. Графік залежності показника степені  $n$  від відносної товщини прогріву.

Таким чином, знайдені залежності (1) – (6) дозволяють розраховувати динаміку нагріву твердих тіл зсередини сталим тепловим потоком за умов радіального поширення теплоти.

В **третьому розділі** приведено експериментальне дослідження процесу зарядки та розрядки акумулятора теплоти за допомогою експериментального стенду (рис.5).

Були проаналізовані наступні режими зарядки та розрядки акумулятора теплоти:

1) Зарядка з під'єднаними повітропроводами. Повітропроводи не були перекриті, тому при цьому через канали акумуляуючої насадки природнім шляхом проходило повітря.

2) Зарядка з від'єднаними повітропроводами. Канали в акумуляуючій насадці були закриті теплоізолюючим матеріалом для запобігання виникненню природної конвекції.

3) Зарядка з включеним вентилятором. Одночасно відбувалися і нагрів акумулюючої насадки, і віддача теплоти від насадки до повітря

4) Розрядка з від'єднаними повітропроводами. Канали в акумулюючій насадці були закриті теплоізолюючим матеріалом для запобігання виникненню природної конвекції.

5) Розрядка з включеним вентилятором.

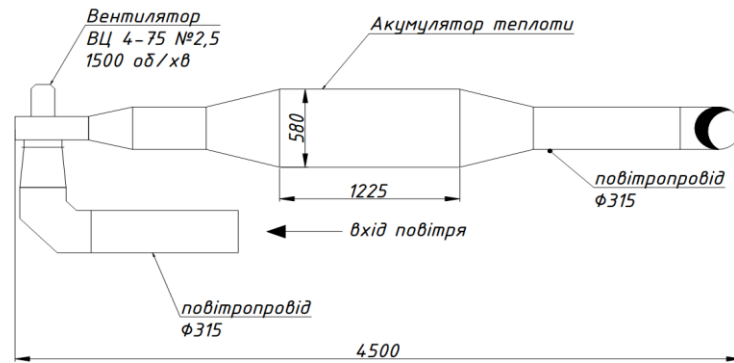


Рис.5. Схема експериментального стенда

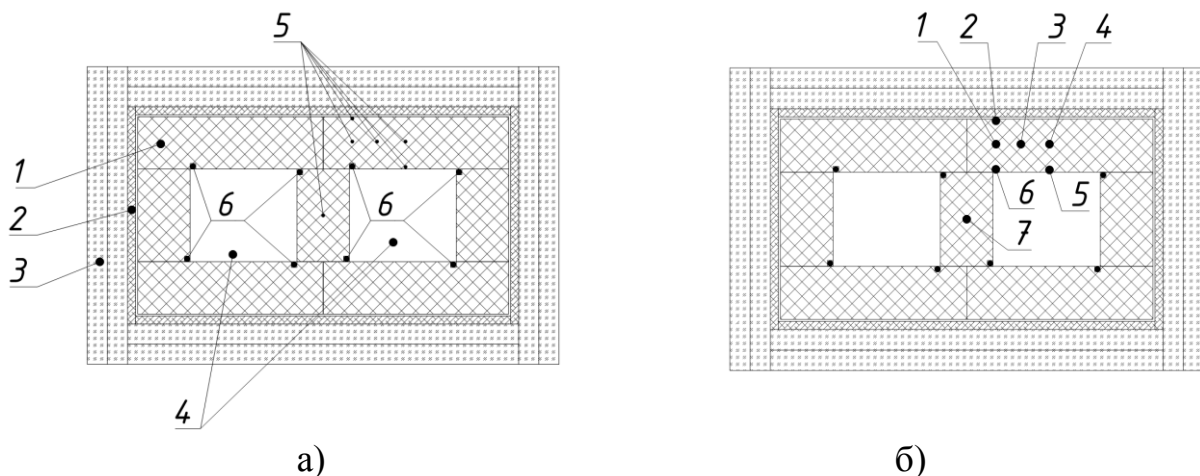


Рис.6. Поперечний переріз акумулятора теплоти (а) та розташування термопар в акумулюючому матеріалі (б).  
1 – шамотна цегла; 2 – магнезитова плита; 3 – мінеральна вата; 4- канал для проходу повітря; 5 – місця розташування термопар; 6 – нагрівальні елементи.

В результаті експерименту були отримані дані щодо розподілення та характеру зміни температур в різних точках акумулюючої насадки

Аналіз отриманих даних показав, що характер зміни температури акумулюючого матеріалу під час нагріву відрізняється від лінійного (що мало б бути з умови незмінності теплового потоку) за рахунок теплових втрат в навколишній простір. Тому для розрахунку часу нагріву матеріалу треба враховувати вплив конвективного теплообміну акумулятора теплоти з навколишнім середовищем. В нашому випадку теплота акумуляції втрачається

через теплоізолюючий шар та шляхом конвективного теплообміну при природній циркуляції повітря через акумулюючу насадку :  $Q_{BT} = Q_B + Q_{II}$ .

Результати експерименту показали, що основну роль відіграють тепловтрати з повітрям  $Q_B \ll Q_{II}$ . Аналіз впливових факторів показав, що в процесі нагріву акумулюючої насадки температури в різних її точках асимптотично прагнуть до певного кінцевого значення, при якому їх швидкість зміни буде дорівнювати нулю. Така ситуація буде характеризуватися умовою рівності потужності нагрівачів в насадці  $Q_H$  та величини тепловтрат в навколишнє середовище  $Q_H = Q_{BT}$ , що і було змодельовано на експериментальному стенді (рис.7.).

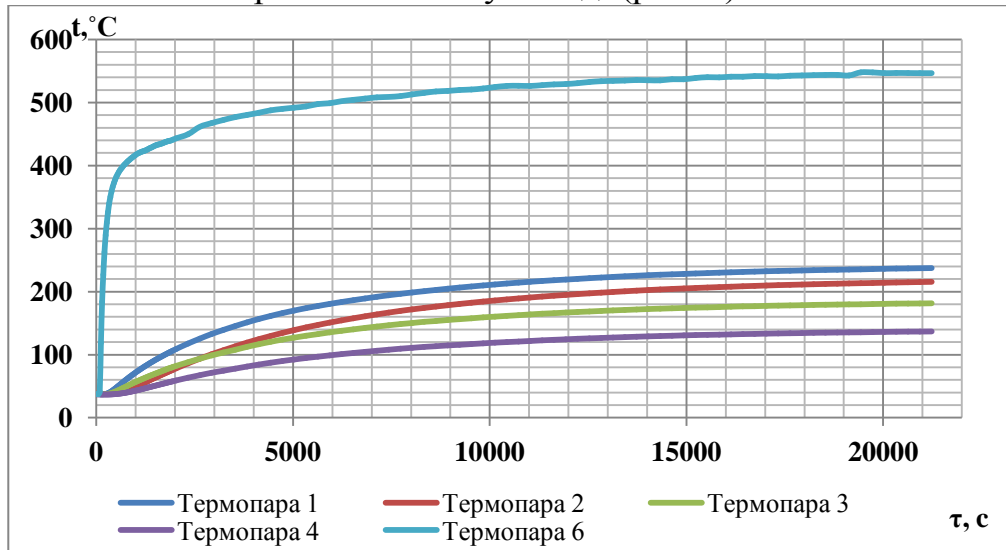


Рис.7. Зміна температур при зарядці акумулятора в умовах примусової циркуляції повітря.

Якщо представити графіки зміни надлишкових температур  $\vartheta_{рез} = t - t_0$  в логарифмічній шкалі, то отримаємо наступний вигляд графіків:

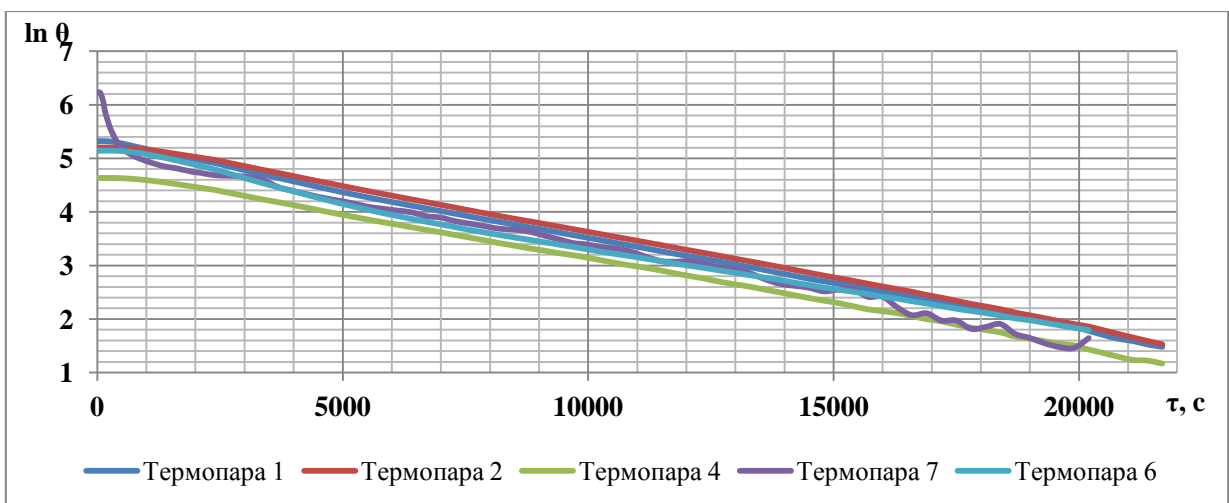


Рис.8. Графіки зміни логарифму надлишкових температур під час розрядки

Таким чином, на основі експериментальних даних встановлено: 1) закон зміни логарифму надлишкової температури при нагріванні та охолодженні матеріалу є лінійним; 2) процес охолодження та нагрівання акумулюючої насадки можна

розділити в часі на дві стадії: стадію неупорядкованого (іррегулярного) процесу і стадію регулярного режиму. Ці дані дозволяють використовувати для опису процесів накопичення та віддачі теплоти теорію регулярного теплового режиму Кондратьєва.

Згідно з цією теорією темп охолодження (нагрівання) однорідного ізотропного тіла при кінцевому значенні коефіцієнта тепловіддачі пропорційний добутку площі зовнішньої поверхні  $S$  тіла на коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  і обернено пропорційний повній теплоємності  $C$  тіла.

$$m = \Psi \frac{\alpha S}{C}, \quad (7)$$

де  $\Psi$  - коефіцієнт пропорційності.

Водночас, темп охолодження визначається наступним чином

$$m = \frac{\ln \vartheta' - \ln \vartheta''}{\tau'' - \tau'} \quad (8)$$

При збільшенні коефіцієнта тепловіддачі темп охолодження прагне до кінцевого межі

$$\lim_{\alpha \rightarrow \infty} m = m_{\infty} \quad (9)$$

яка пропорційна коефіцієнту температуропровідності

$$a = Km_{\infty}, \quad (10)$$

де коефіцієнт пропорційності  $K$  залежить лише від форми та розмірів тіла, має розмірність площі і через це називається коефіцієнтом форми тіла.

На основі аналізу теорії регулярного теплового режиму сформульовані основні положення щодо нагріву акумулюючої насадки внутрішніми джерелами теплоти:

1) Темп нагріву тіла не залежить від потужності джерел теплоти та їх розташування в тілі та чисельно дорівнює темпу охолодження.

2) Критерії  $\Psi$  для випадків охолодження та нагріву внутрішніми джерелами теплоти чисельно дорівнюють один одному, хоч і мають різний фізичний зміст.

3) Для систем з джерелами теплоти коефіцієнт форми тіла  $K$  має такий же сенс і те ж чисельне значення, що і в звичайній теорії регулярного режиму.

На основі експериментальних даних розраховані чисельні значення коефіцієнта форми тіла  $K$  та коефіцієнта пропорційності  $\Psi$ :

5)  $\Psi = 0,239$

6)  $K = 0,00248$

Застосування знайдених коефіцієнтів та відомих залежностей теорії регулярного теплового режиму (7) – (10) дає можливість розраховувати тривалість нагріву та охолодження акумулюючої насадки та зміну температур матеріалу в часі в умовах конвективного теплообміну з навколишнім середовищем.

Порівняння даних, отриманих теоретичним шляхом, з експериментальними для зміни логарифму надлишкової температури в процесі примусового охолодження матеріалу (рис. 9.) показало, що розрахункова залежність підтверджується експериментальними даними, похибка у всьому розглянутому діапазоні не перевищує 10%.

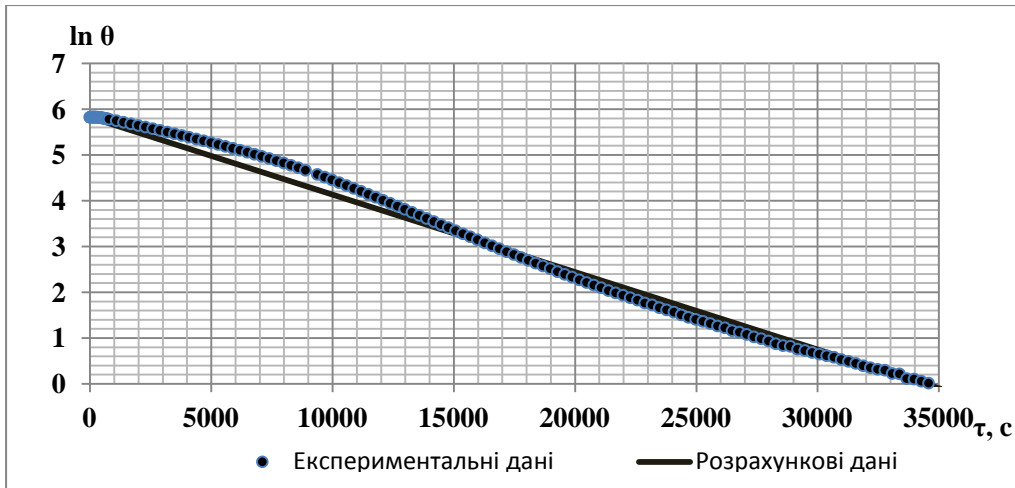


Рис.9. Порівняння розрахункових та експериментальних даних.

У четвертому розділі розроблена методика вибору оптимальних конструктивних параметрів та сформульовані рекомендації стосовно режимів роботи акумулятора теплоти на основі твердих матеріалів.

Конструкція акумулятора теплоти повинна забезпечувати:

- 1) Максимальну швидкість досягнення середньомасової температури акумулюючого матеріалу до необхідного значення при зарядці;
- 2) Максимальне використання акумулюючого об'єму;
- 3) Мінімальний розмір акумулятора теплоти;
- 4) Мінімальні температурні напруження в акумулюючому матеріалі.

Аналіз даних, отриманих на основі теоретичного розрахунку процесу нагріву циліндричного тіла сталим тепловим потоком зсередини, показав, що при нагріванні теплота нерівномірно розподіляється по товщині циліндру (рис. 10).

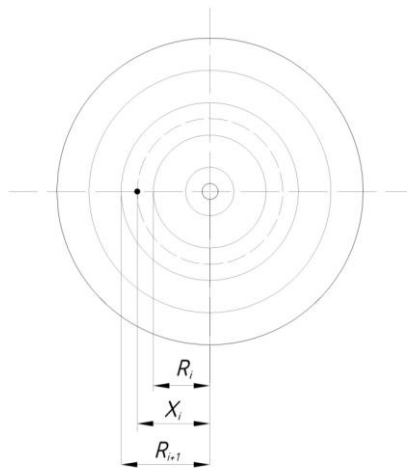


Рис.10. Розрахункова схема

Розраховувалась кількість теплоти, акумульована в певній області циліндричного тіла при нагріванні до різних температур:

$$Q_i = m_i \cdot c \cdot \Delta t = \pi \cdot (R_{i+1}^2 - R_i^2) \cdot l \cdot \rho \cdot (t_{X_i} - t_0)$$

де  $t_0$  - початкова температура, °C,  $t_{x_1}$  - температура в точці  $X_1$ , °C,  $l$  - довжина циліндру, м.

Найбільша нерівномірність спостерігається в кінці інерційного періоду (рис.10).

З отриманих даних видно, що на кінець інерційного періоду внутрішня половина циліндру (рис.11.) містить в собі 88,2% акумульованої теплоти, при цьому маса цієї частини складає 27,5% від загальної маси тіла.

Ця нерівномірність зменшується з плином часу та через достатньо довгий відрізок ( $Fo \gg Fo'$ ) практично зникає (рис. 12). Тому для максимального використання акумулюючого об'єму необхідно, щоб тривалість нагріву значно перевищувала тривалість інерційного періоду.

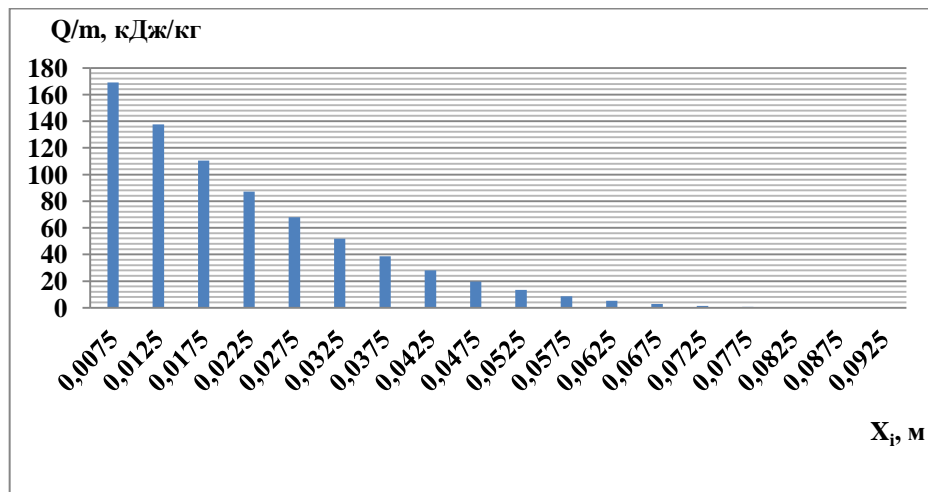


Рис.11. Розподіл теплоти в тілі на одиницю маси в кінці інерційного періоду.

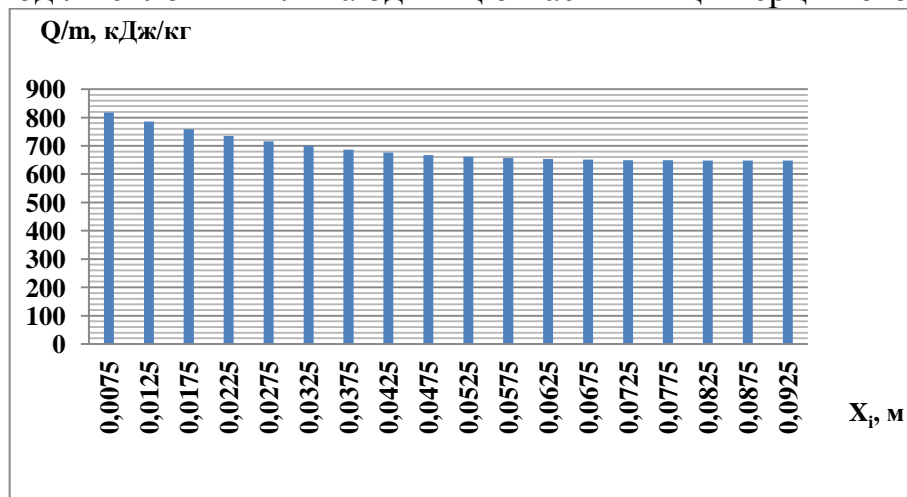


Рис.12. Розподіл теплоти в тілі на одиницю маси в кінці нагріву ( $Fo \gg Fo'$ ).

Був проведений аналіз впливу кількості нагрівальних елементів на час нагріву матеріалу до необхідного значення при однаковому значення сумарної теплової потужності. Показано, що існує мінімально допустима кількість нагрівальних елементів, яка визначається часом акумулювання, сумарною тепловою потужністю

та масою акумулюючого матеріалу. Обмежуючими факторами в даному випадку є температура поверхні нагріву та температура нагрівального елемента.

На рис.13 показана зміна температур при нагріванні сталим тепловим потоком зсередини. Верхня лінія – графік зміни відносної температури поверхні, яка сприймає тепловий потік. Нижня лінія – графік зміни відносної температури зовнішньої поверхні. Середня лінія – графік зміни середньомасової температури матеріалу.

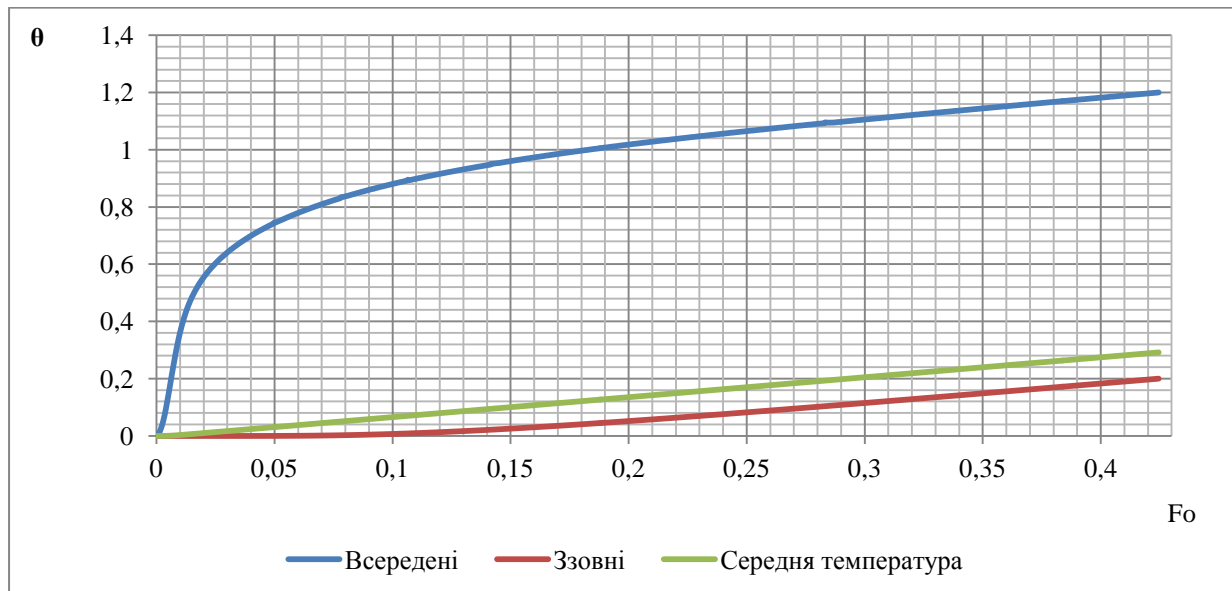


Рис.13. Зміна температур при нагріванні циліндричного тіла з середини при  $q = const$

Видно, що середньомасова температура близька по значенню до температури зовнішньої поверхні, та на багато менше, ніж температура поверхні, яка сприймає тепловий потік. Тому, щоб акумулюючий матеріал отримав повну кількість теплоти, що відповідає його тепломісткості при середньомасовій температурі, що дорівнює необхідній температурі нагріву акумулюючої насадки, поверхня нагріву повинна бути значно перегріта. А це може бути недопустимо, тому що вона обмежена температурою плавлення матеріалу та граничною температурою експлуатації нагрівача, яка в процесі нагріву більше температури поверхні, яку він нагріває.

Тому, для того щоб нагріти матеріал до необхідної температури і не перегріти поверхню нагріву, повинні бути періоди без підводу теплоти для вирівнювання температури в матеріалі, коли температура поверхні досягає критичного значення. Перепад температур, а з ним і можливість перегріву поверхні, залежить від значення густини теплового потоку на поверхню. А густина теплового потоку, при однаковій сумарній потужності нагріву, буде залежати від кількості нагрівачів. Чим більше нагрівачів, тем менша густина теплового потоку і товщина нагріву.

На основі аналізу теоретичних даних та результатів комп'ютерного моделювання розроблені рекомендації щодо ефективної відстані між нагрівальними елементами. Для того, щоб не було зон, які практично не



прогриваються (на рис 14.а мають зелений колір) в зв'язку з особливостями поширення теплоти при нагріванні зсередини, необхідно, щоб відстань між нагрівальними елементами була не більшою ніж два еквівалентні радіуси (рис.14.б).

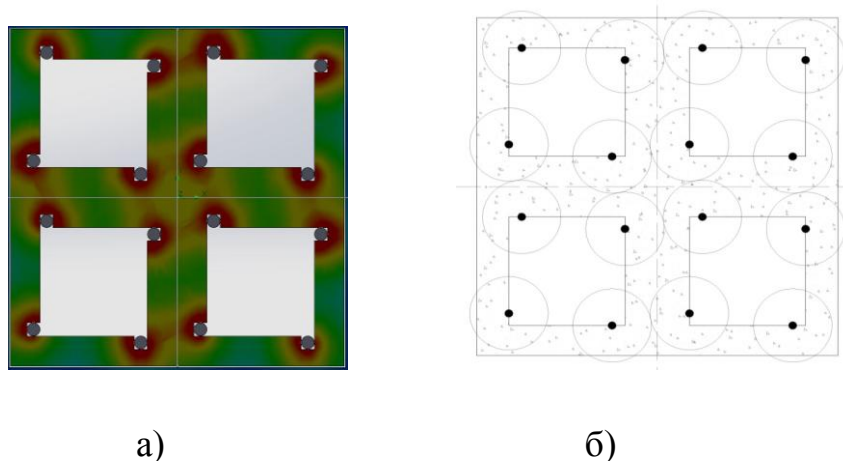


Рис.14. Розподілення теплоти в насадці акумулятора.

а) температурне поле при нагріванні; б) зображення еквівалентних циліндрів, радіуси яких отримані розрахунковим шляхом.

На основі аналізу впливових факторів розроблений наступний алгоритм визначення конструктивних параметрів акумулятора теплоти:

- 1) Визначення розрахункового теплового навантаження;
- 2) Визначення необхідної тривалості періодів зарядки та розрядки. При використанні дво- та тризонного тарифу на електроенергію тривалість зарядки залежить від тривалості нічного періоду. Тривалість розрядки може визначатись, наприклад, режимом роботи приміщень (якщо розглядаються громадські та адміністративні будівлі, в яких допускається в неробочий період підтримувати «чергову» температуру внутрішнього повітря);
- 3) Визначення маси акумулюючого матеріалу. Визначальними чинниками в даному випадку будуть виступати теплове навантаження, період роботи системи опалення та діапазон робочих температур матеріалу, що акумулює теплоту.
- 4) Враховуючи кількість теплоти, яку треба акумулювати, та час, за який це необхідно зробити, відбувається визначення сумарної теплової потужності нагрівальних елементів акумулятора теплоти;
- 5) Виходячи з тривалості періоду нагріву та допустимих температур акумулюючого матеріалу та нагрівальних елементів розраховується кількість нагрівачів, використовуючи методику визначення еквівалентного радіуса нагріву;
- 6) В залежності від технічних можливостей зборки акумулятора теплоти, обирається спосіб розташування нагрівальних елементів в насадці;
- 7) Після розрахунку еквівалентного радіуса прогріву для обраної кількості нагрівальних елементів визначається оптимальна відстань між ними;

8) В залежності від схеми розташування нагрівальних елементів, розрахункового теплового потоку на поверхню та теплофізичних властивостей визначається товщина акумулюючого шару;

9) Визначення розмірів каналів для проходу повітря та їх кількості в залежності від теплової потужності акумулятора теплоти

Запропонований алгоритм дозволяє визначити всі необхідні конструктивні параметри акумулюючої насадки, спираючись на режим роботи системи опалення. При цьому її можна використовувати для різних способів нагріву матеріалу, що акумулює теплоту. При зовнішньому нагріві для цього необхідно використовувати співвідношення методу теплових діаграм Семікіна, при внутрішньому – методику розрахунку нагріву сталим тепловим потоком, розроблену в розділі 2 даної роботи.

Техніко-економічний аналіз показав доцільність застосування акумуляторів теплоти для потреб теплопостачання житлових та громадських будівель.

## ВИСНОВКИ

1. При аналізі сучасних способів акумулювання теплоти в системах теплопостачання будівель та акумулюючі матеріалів показано, що для акумулювання теплоти за рахунок нічних тарифів на електроенергію доцільно використовувати тверді теплоакumuлюючі матеріали. Це дає змогу запасати велику кількість теплоти в відносно невеликому об'ємі, та створювати акумулятори простої конструкції. Також показано, що основними параметрами акумулятора теплоти, які впливають на ефективність його роботи, є товщина акумулюючого матеріалу, питомий тепловий потік на поверхню та перепад температур по товщині матеріалу. Однак, сучасні аналітичні методи розрахунку нестационарної теплопроводності не дають змоги повноцінно використовувати їх для аналізу теплообміну в акумулюючій насадці. Для цих потреб доцільно застосовувати наближені інженерні методики.

2. Доказано, що метод теплових діаграм Семікіна, який на сьогоднішній день використовується для розрахунку нагріву тіл сталим тепловим потоком, не можна використовувати у випадку розташування джерел теплоти всередині твердого тіла. Тому на основі даних, отриманих за допомогою комп'ютерного моделювання, буда розроблена наближена методика розрахунку нагріву твердих тіл сталим тепловим потоком зсередини.

3. Виконано експериментальне дослідження роботи акумулятора теплоти на основі твердих матеріалів. На основі отриманих експериментальних даних зроблений висновок, що для опису процесу зарядки та розрядки акумулятора доцільно використовувати теорію регулярного теплового режиму. Аналіз отриманих даних дозволив знайти коефіцієнт форми тіла та коефіцієнт пропорційності для випадку конвективного теплообміну всередині твердого тіла при його нагріванні внутрішніми джерелами теплоти. Порівняння розрахункових та експериментальних даних підтвердило правильність запропонованої методики розрахунку процесу зарядки та розрядки акумулятора теплоти.

4. Розроблена методика визначення оптимальних конструктивних параметрів та режиму роботи акумулятора теплоти в залежності від опалювального навантаження. На основі даних, отриманих за допомогою розробленої методики розрахунку нагріву твердих тіл зсередини сталим тепловим потоком, дані рекомендації щодо оптимізації тривалості нагріву акумуляючої насадки, вибору кількості нагрівальних елементів та їх розташування, розрахунку товщини акумуляючого шару.

5. Отриманий термін окупності (1,8 року) дозволяють зробити висновок, що запропоновані розробки можна вважати економічно ефективними.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. О.М. Шраменко. Застосування акумуляторів тепла на основі твердих матеріалів в системах теплопостачання з використанням електроенергії / С.С. Титар, О.А. Климчук, О.М. Шраменко // Науковий журнал «Вісник вінницького політехнічного інституту», випуск 4 Вінниця 2012 с. 112-115.

*Розробка конструкції акумулятора теплоти на основі твердих матеріалів, аналізі властивостей твердих акумуляючих матеріалів.*

2. О.М. Шраменко. Методы интенсификации процессов разрядки в каналах аккумуляторов тепла на основе твердых материалов / О.А. Климчук, О.М. Шраменко// Сборник научных трудов «Вестник Национального технического университета «ХПИ», Выпуск 13, Харьков 2013 с.136-140.

*Аналіз способів інтенсифікації конвективного теплообміну між повітрям та акумуляючим матеріалом та комп'ютерне моделювання цього процесу.*

3. О.М. Шраменко. Підвищення ефективності паливо використання в промислових печах./ О.Д. Димитров, О.М. Шраменко, В.А. Пядухов. // Збірник наукових праць «Вісник національного технічного університету «ХПІ», Випуск №16, Харків 2015 с.141-146.

4. О.М. Шраменко. Підігрів компонентів горіння та інтенсифікація роботи печей./ О.Д. Димитров, О.М. Шраменко, В.А. Пядухов // Збірник наукових праць «Вісник національного технічного університету «ХПІ», Випуск №17, Харків 2015 с.103-110.

*Виконаний розрахунок теплового балансу високотемпературної теплотехнологічної установки.*

5. О.М. Шраменко. Складний теплообмін у каналах з додатковими вставками/ О.Д. Димитров, О.А. Климчук, О.М. Шраменко // Науково-технічний збірник «Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві», Випуск №2, Вінниця 2015 с.129-133.

*Аналіз факторів, які впливають на ефективність теплообміну в каналах з додатковими вставками.*

6. О.М. Шраменко. Порівняльний аналіз систем децентралізованого теплопостачання житлових будівель із використанням електроенергії / А.С. Мазуренко, О.А. Климчук, О.М. Шраменко, О.А. Сичова. // Східно-Європейський журнал передових технологій, Випуск 5/8 2014 р. с. 21-25.

*Аналіз ефективності використання акумулятора теплоти в системах децентралізованого тепlopостачання.*

7. А.Н. Шраменко. Альтернативное теплоснабжение зданий с использованием природных источников энергии / А.А. Климчук, А.Н. Шраменко // Збірник матеріалів міжнародної науково-практичної конференції «Екологічні проблеми чорного моря», Одеса 2010 с. 193-196

8. А.Н. Шраменко. Анализ способов применения различных теплоаккумулирующих материалов/ А.А. Климчук, А.Н. Шраменко // Збірник наукових праць X всеукраїнської науково-технічної конференції студентів і аспірантів «Еколого-енергетичні проблеми початку XXI століття», Одеса 2010 с.81-83

9. А.Н. Шраменко. Использование возобновляемых источников энергии в аккумуляторных системах теплоснабжения/ А.А. Климчук, А.Н. Шраменко // Збірник статей VI Всеукраїнської науково-практичної конференції «Охорона навколишнього середовища промислових регіонів як умова сталого розвитку України», Запоріжжя 2010 с. 160-163

*Аналіз актуальних способів використання нетрадиційних джерел енергії та способів акумулювання теплоти в системах тепlopостачання житлових та адміністративних будівель.*

10. О.М. Шраменко. Інтенсифікація процесу розрядки акумулятора тепла на основі твердих матеріалів/ О.А. Климчук, О.М. Шраменко // Збірник статей VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Охорона навколишнього середовища промислових регіонів як умова сталого розвитку України», Запоріжжя 2012, с. 120-122

*Аналіз впливових факторів конвективного теплообміну в каналах акумулятора теплоти та способів його інтенсифікації.*

## АНОТАЦІЯ

**Шраменко О.М. Удосконалення конструкції і режимів роботи акумуляторів теплоти на основі твердих матеріалів. - На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 - технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. - Одеський національний політехнічний університет, Одеса, 2016.

Робота присвячена підвищенню ефективності акумуляторів теплоти на основі твердих матеріалів шляхом удосконалення їх конструкції і режимів роботи в системах тепlopостачання будівель.

Проаналізовано різні способи акумулювання теплоти в системах тепlopостачання будівель. Показано, що приминение акумуляторів теплоти на основі твердих речовин в системах тепlopостачання є актуальним при використанні двох-і трьохзонний тарифу на електроенергію. Основними перевагами таких акумуляторів теплоти являються простота конструкції і відносно малий обсяг.

На основі результатів комп'ютерного моделювання розроблено інженерну методику розрахунку нагріву твердих тіл зсередини при граничних умовах другого

роду. Доведено, що використовується для розрахунку зовнішнього нагріву метод теплових діаграм Семикіна непридатний для випадку нагрівання зсередины в зв'язку з відмінністю в значенні коефіцієнта усереднення теплового потоку.

Змонтований експериментальний стенд з вивчення акумулювання теплоти твердими речовинами. Досліджено процеси зарядки і розрядки акумулятора теплоти при різних режимах роботи. На основі даних, отриманих в результаті експерименту, теорія теплового регулярного режиму отримала подальший розвиток в частині розрахунку охолодження і нагрівання тіл при конвективному теплообміні в каналах і внутрішніх джерелах теплоти.

Запропоновано алгоритм визначення конструктивних параметрів акумулятора теплоти в залежності умов роботи системи тепlopостачання. Розроблено рекомендації по розташуванню нагрівальних елементів в акумулюючої насадці і вибору їх кількості, методика визначення оптимальної товщини акумулює шару, габаритів акумулюючої насадці і питомої теплового потоку на поверхню нагріву.

Показана економічна доцільність використання акумулятора теплоти на основі твердих речовин в системах опалення будівель.

**Ключові слова:** акумулятор теплоти, нестационарна теплопровідність, регулярний тепловий режим, системи тепlopостачання.

## АННОТАЦІЯ

**Шраменко А.Н. Усовершенствование конструкции и режимов работы аккумуляторов теплоты на основе твёрдых материалов. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 – техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. – Одесский национальный политехнический университет, Одесса, 2016.

Работа посвящена повышению эффективности аккумуляторов теплоты на основе твёрдых материалов путём улучшения их конструкции и режимов работы в системах теплоснабжения зданий.

Проанализированы различные способы аккумуляирования теплоты в системах теплоснабжения зданий. Показано, что применение аккумуляторов теплоты на основе твёрдых веществ в системах теплоснабжения является актуальным при использовании двух- и трёхзонного тарифа на электроэнергию. Основными преимуществами таких аккумуляторов теплоты являются простота конструкции и относительно малый объём.

Показано, что существующие аналитические методики расчёта нестационарной теплопроводности практически не применимы для описания процессов зарядки и разрядки аккумулятора. На основе результатов компьютерного моделирования разработана инженерная методика расчёта нагрева твёрдых тел внутри при граничных условиях второго рода. Доказано, что используемый для расчёта внешнего нагрева метод тепловых диаграмм Семикіна

неприменим для случая нагрева изнутри в связи с отличием в значении коэффициента усреднения теплового потока.

Смонтирован экспериментальный стенд по изучению аккумулирования теплоты твёрдыми веществами. Исследованы процессы зарядки и разрядки аккумулятора теплоты при различных режимах работы. Экспериментальным путём доказано, что для описания процесса нагрева и охлаждения аккумулирующей насадки допустимо использовать теорию регулярного теплового режима. На основе данных, полученных в результате эксперимента, теория теплового регулярного режима получила дальнейшее развитие в части расчёта охлаждения и нагрева тел при конвективном теплообмене в каналах и внутренних источниках теплоты. Сравнение экспериментальных и расчётных данных показало правильность предложенной методики, погрешность не превысила 10%.

Предложен алгоритм определения конструктивных параметров аккумулятора теплоты в зависимости условий работы системы теплоснабжения. Разработаны рекомендации по расположению нагревательных элементов в аккумулирующей насадке и выбору их количества, методика определения оптимальной толщины аккумулирующего слоя, габаритов аккумулирующей насадки и удельного теплового потока на поверхность нагрева.

Показана экономическая целесообразность использования аккумулятора теплоты на основе твёрдых веществ в системах отопления зданий.

**Ключевые слова:** аккумулятор теплоты, нестационарная теплопроводность, регулярный тепловой режим, системы теплоснабжения.

## ABSTRACT

**Shramenko O.M.** Improving the design and operation modes of heat batteries based on solid materials. - The manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.14.06 - Technical thermal physics and industrial heat and power engineering. - Odessa National Polytechnic University, Odessa, 2016.

The work is dedicated to increasing the efficiency of heat batteries based on solid materials by improving their design and operation modes in heating systems of buildings.

Analyzes the various ways of heat accumulating in heat supply systems of buildings. It is shown that the use of heat accumulators based on solid materials in heating systems is of current interest when using a dual- and three-zone electricity tariff. The main advantages of these heat batteries are a simple design and a relatively small amount.

Based on results of computer modeling developed engineering method of calculating heating of solids from inside with boundary conditions of the second kind. It is proved that Semykin's method of heating charts that is used for calculating external heating is unsuitable in the case of heating from inside due to the difference in the value of the coefficient of heat flow averaging.

Experimental stand for the study of heat accumulation of solids was mounted. The processes of charging and discharging of the heat battery were investigated under

different operating conditions. Based on data derived from the experiment, the theory of regular thermal regime has been further developed in the calculation of cooling and heating bodies in convective heat transfer in the channels and internal sources of heat.

The algorithm for determining the design parameters of the heat battery depending on operating conditions of heating system was suggested. Recommendations for the location of heating elements in accumulating nozzle and selection of their quantity, method of determining the optimum thickness of the accumulating layer, accumulating nozzle size and specific heat flow to the heating surface.

The economic feasibility of using heat batteries based on solid materials in heating buildings was shown.

**Keywords:** battery heat, unsteady heat conduction, regular thermal mode, heating system.