

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ АКУМУЛЮВАННЯ ТЕПЛОТИ ТВЕРДИМИ ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ ЕЛЕКТРОТЕПЛОВОГО АКУМУЛЯТОРА

© Хіменко О.В., 2016

Проведені розрахункові та експериментальні дослідження теплових процесів та акумулюючої здатності твердих теплоакумулюючих матеріалів. Проаналізована зміна теплофізичних властивостей обраних теплоакумулюючих матеріалів залежно від температури. Оцінено питому теплоакумулюючу здатність в діапазоні температур від 70 °С до 650 °С таких матеріалів: магнезит, шамот, динас, корунд.

Наступним етапом було проведення експериментальних досліджень з метою підтвердження даних, отриманих у результаті розрахункових досліджень. Дослідження проводили на електротепловому акумуляторі (ЕТА) електричною потужністю 2,4 кВт вітчизняного виробництва з теплоакумулюючими елементами із магнезиту. Отримано розподіл температури в стінці каналів теплоакумулюючих елементів. Також проводились заміри температури нагрітого повітря в каналах теплоакумулюючих елементів та на виході із ЕТА. Заміри температур проводили термопарами хромель-алюмель (ТХА) у керамічній оболонці з діапазоном вимірювань від -50 °С до 1300 °С. У зонах з високими температурами термопари прокладались у чохлі із термостійкої тканини. У результаті експериментальних досліджень отримано розподіл температур у теплоакумулюючих елементах ЕТА. На основі цих даних було розраховано кількість акумульованої теплоти теплоакумулюючими елементами ЕТА за повний цикл його роботи.

Ключові слова: електротепловий акумулятор, коефіцієнт теплопровідності, коефіцієнт теплоємності, коефіцієнт температуропровідності, безрозмірні числа подібності Фур'є  $Fo$  та Біо  $Bi$ , кількість акумульованої теплоти, теплоакумулююча здатність.

Conducted calculated and experimental research of thermal processes and storage capacity of solid heat storage materials. Analyzed the change of the thermo physical properties of the selected heat storage materials depending on temperature. Estimated specific heat storage capacity in the temperature range from 50 °C to 650 °C such materials: magnesite, chamotte, dinas, corundum.

The next step was to carry out experimental studies in order to confirm data obtained as a result of calculated studies. Studies were carried out on electric thermal storage (ETS) of electric power 2.4 kW domestic production with heat storage elements from the magnesite. Obtained temperature distribution in the wall of the channels of the heat storage elements. Also conducted measurements of the temperature of the heated air in the channels of the heat storage elements and the output of the ETS. Measurements temperatures were carried out with thermocouples chromel-alumel in ceramic shell with a measurement range from -50 °C to 1300 °C. In areas with high temperatures thermocouples were laid in the case of heat-resistant fabric. As a result of experimental studies obtained the temperature distribution in the heat storage elements of ETS. Based on these data it was calculated the amount of stored heat by heat storage elements of ETS for the complete cycle of its operation.

Key words: electric thermal storage, coefficient of thermal conductivity, coefficient of thermal capacity, temperature conductivity, dimensionless numbers similarity Fourier  $Fo$  and Bio  $Bi$ , the amount of stored heat, the heat storage capacity.

**Постановка проблеми.** Для широкого впровадження систем електроопалення з електро-тепловими акумуляторами (ЕТА) необхідна комплексна оцінка ефективності роботи таких опалювальних систем, а саме: дослідження теплофізичних властивостей твердих теплоакumuлюючих матеріалів і теплових процесів, що протікають в ЕТА в режимі заряду і віддачі теплоти. Такі дослідження необхідні для оцінки факторів, які впливають на теплообмінні процеси та процеси акумулювання теплоти у ЕТА в режимі заряду та віддачі теплоти.

Використання подібних систем електроопалення регламентується ДБН.2.5-67:2013 “Опалення, вентиляція і кондиціонування” пункт 6.1.3. Також рекомендується впровадження систем електроопалення, які передбачають використання електричного теплоакumuляційного обігріву та гарячого водопостачання “Державною цільовою економічною програмою енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010–2016 роки”.

У [1] було розпочато вивчення ефективності застосування твердих теплоакumuлюючих матеріалів для ЕТА. Виконане математичне моделювання теплообмінних процесів у теплоакumuлюючих елементах ЕТА з магнезиту, феолисту та шамоту. Отримано розподіл температури у стінці каналів теплоакumuлюючих елементів в режимі заряду та віддачі теплоти ЕТА. На основі цих даних було розраховано тепловіддачу від стінок каналу до потоку повітря, що нагрівається.

**Мета роботи.** На основі теоретичних та експериментальних досліджень оцінити та проаналізувати динамічні характеристики теплоакumuлюючих елементів ЕТА та їх акумулюючу здатність.

**Теоретичні дослідження.** Проаналізовано зміну теплофізичних властивостей твердих теплоакumuлюючих матеріалів залежно від температури. Формули для розрахунку коефіцієнтів теплопровідності та теплоємності [2] наведено у табл. 1. Для феолисту наведено осереднені значення теплофізичних властивостей [3].

Таблиця 1

Теплофізичні властивості твердих теплоакumuлюючих матеріалів

Матеріал	$\lambda$ , Вт/м·°С	$c_p$ , кДж/кг·°С	$\rho_{ср}$ , кг/м <sup>3</sup>
Магнезит	$1,05 + 0,29 \cdot 10^{-3} T_{ТАМ}$	$4,7 - 1,7 \cdot 10^{-3} T_{ТАМ}$	3000
Шамот	$0,88 + 0,23 \cdot 10^{-3} T_{ТАМ}$	$0,84 + 0,58 \cdot 10^{-3} T_{ТАМ}$	2200
Корунд	$0,79 + 0,42 \cdot 10^{-3} T_{ТАМ}$	$2,1 + 1,9 \cdot 10^{-3} T_{ТАМ}$	3300
Динас	$0,837 + 0,25 \cdot 10^{-3} T_{ТАМ}$	$0,93 + 0,69 \cdot 10^{-3} T_{ТАМ}$	2200
Феолит	2,1	0,92	3900

На рис. 1, 2 наведено коефіцієнти теплопровідності та теплоємності для діапазону температур 650–70 °С. Це є максимальна та мінімальна температури, відповідно до яких теплоакumuлюючі елементи ЕТА нагріваються в режимі заряду та остигають у режимі віддачі теплоти.

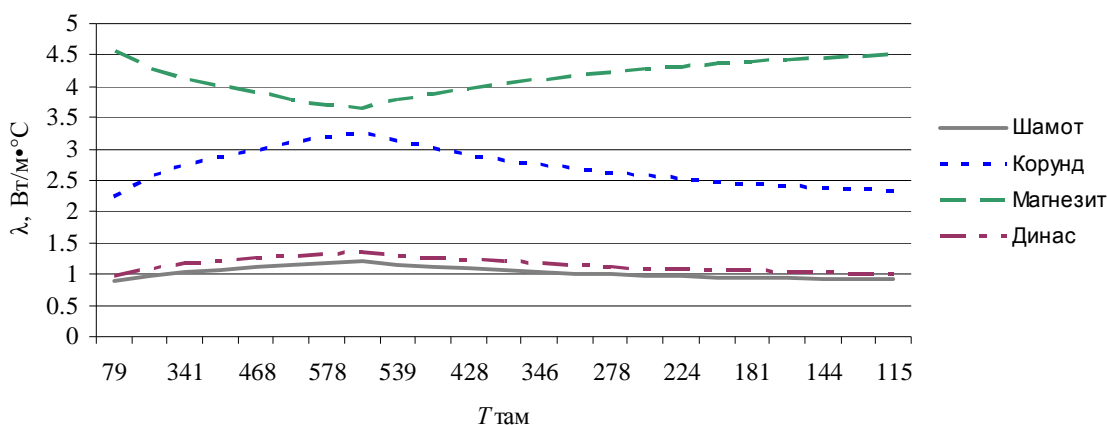


Рис. 1. Зміна коефіцієнта теплопровідності залежно від температури  $T_{ТАМ}$

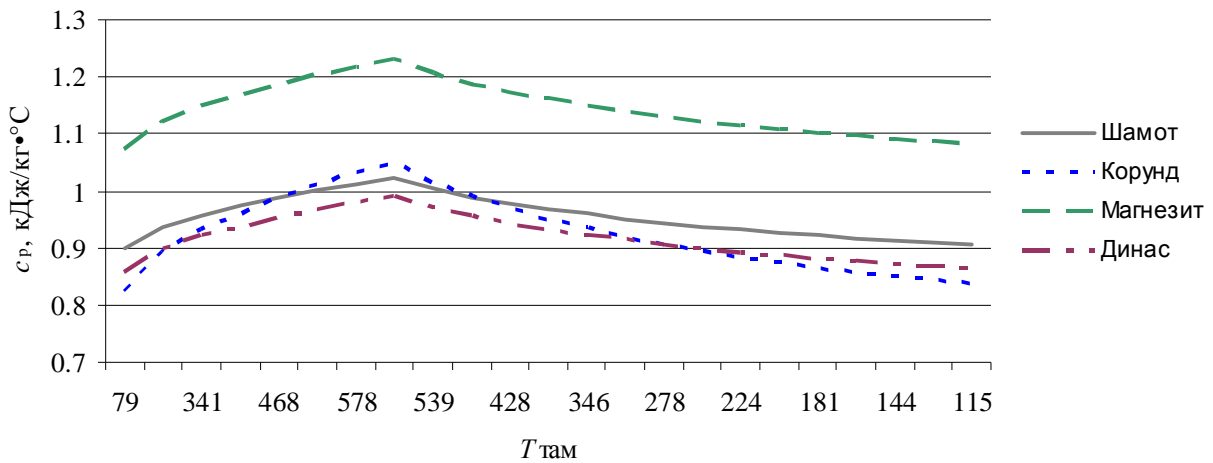


Рис. 2. Зміна коефіцієнта теплоємності залежно від температури  $T_{\text{там}}$

Проаналізувавши отримані результати, можна зазначити, що шамот, корунд та динас характеризуються прямою залежністю зміни коефіцієнта теплопровідності від температури (рис. 1). У процесі нагрівання та охолодження магнезит має найбільші значення коефіцієнтів теплопровідності та теплоємності серед досліджуваних матеріалів (рис. 1, 2). Також слід зазначити, що коефіцієнт теплопровідності магнезиту обернено пропорційний зростанню температури.

Наступним етапом було визначення коефіцієнта температуропровідності вибраних теплоакуючих матеріалів (див. рис. 3).

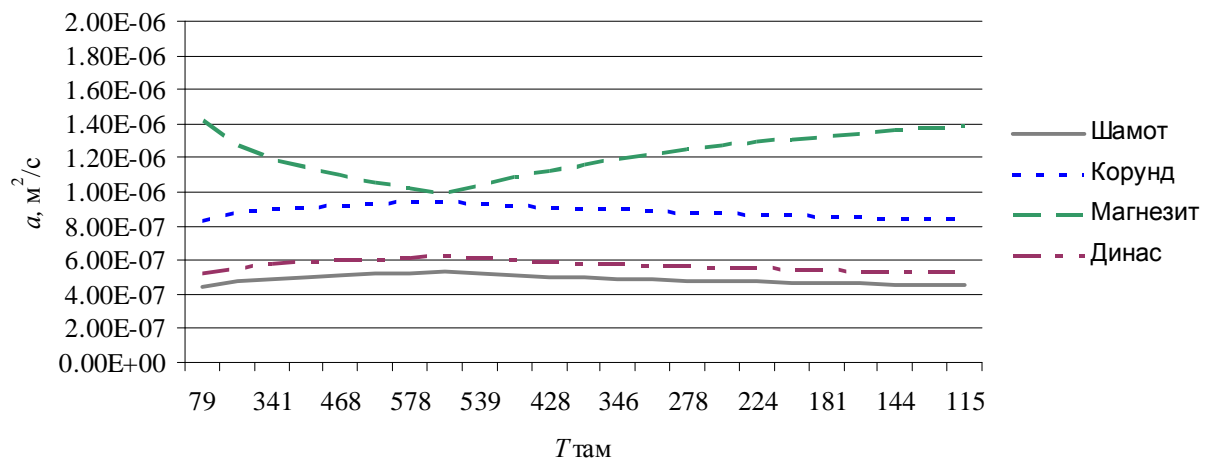


Рис. 3. Зміна коефіцієнта температуропровідності залежно від температури  $T_{\text{там}}$

На рис. 3 видно, що найбільше значення коефіцієнта температуропровідності має знову ж таки магнезит, а найменше значення спостерігається у шамоту.

Розраховано безрозмірні числа подібності Фур'є  $Fo$  та Біо  $Bi$  для нестационарного теплового режиму теплоакуючих елементів ЕТА. В [4] проведено математичне моделювання теплових процесів у теплоакуючому елементі з шамоту з повітряними каналами круглого перерізу в режимі заряду та віддачі теплоти ЕТА. На основі отриманого розподілу температур у стінці повітряних каналів теплоакуючих елементів було розраховано коефіцієнти тепловіддачі від стінок каналу до потоку повітря, що нагрівається. Значення коефіцієнтів тепловіддачі  $\alpha_k$  розраховували за довжини повітряного каналу 0,3 м та швидкості повітря  $w = 3$  м/с. Коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_{пр}$  в режимі заряду за природної конвекції знаходиться у діапазоні 13–14 Вт/(м<sup>2</sup>·°C), а в режимі віддачі теплоти коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_k$  за примусової конвекції – 18,5–19,5 Вт/(м<sup>2</sup>·°C). Нижче наведено результати розрахунків чисел  $Fo$  та  $Bi$  (рис. 4, 5).

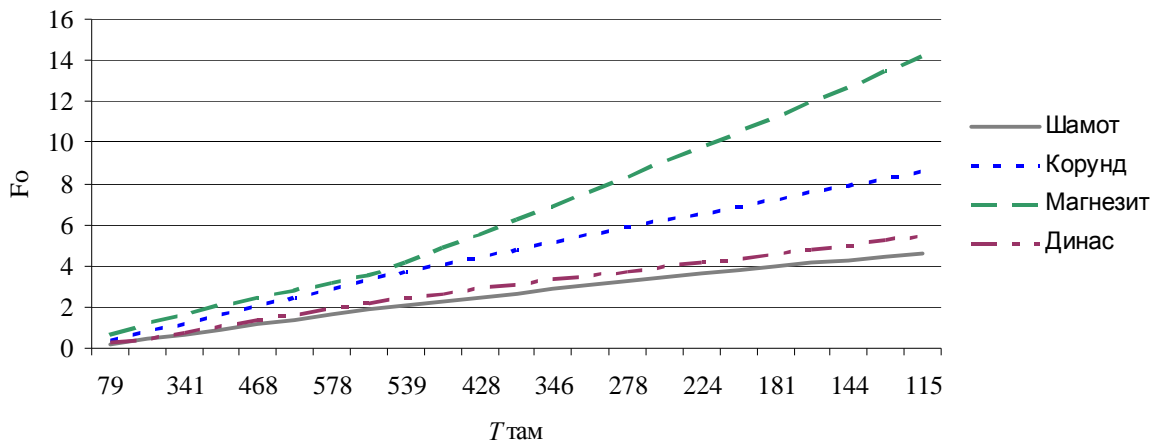


Рис. 4. Зміна числа  $Fo$  у режимі заряду та віддачі теплоти ЕТА

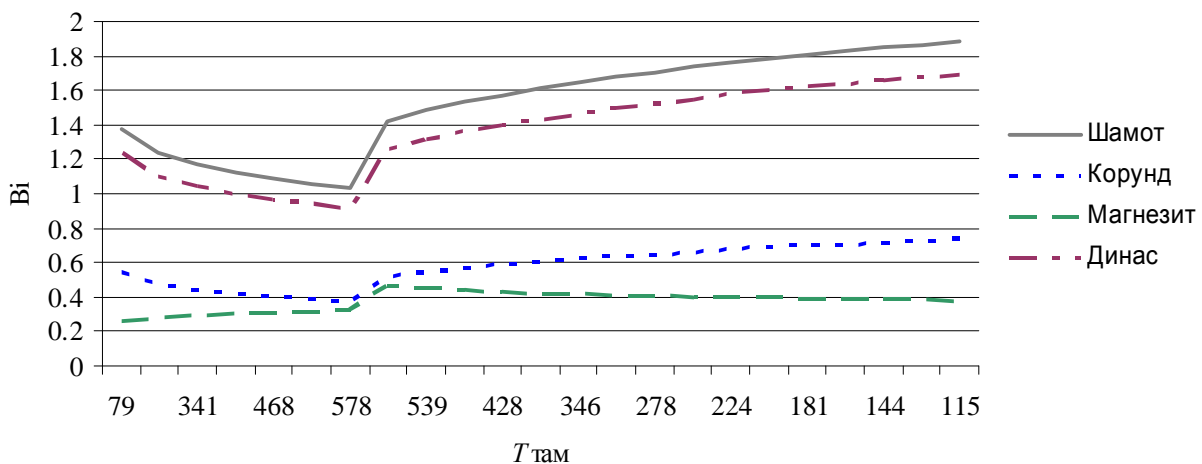


Рис. 5. Зміна числа  $Bi$  у режимі заряду та віддачі теплоти ЕТА

Числа  $Bi$  (рис. 5) зменшуються в період заряду ЕТА (7 годин) внаслідок зростання коефіцієнта теплопровідності повітря  $\lambda_n$  та меншого коефіцієнта тепловіддачі за природної конвекції. В режимі віддачі теплоти ЕТА (17 годин) коефіцієнт тепловіддачі при примусовій конвекції збільшується. Водночас зменшується коефіцієнт теплопровідності повітря  $\lambda_n$ , що відбивається на зростанні числа  $Bi$ .

Також було розраховано питому теплоакумулюючу здатність обраних матеріалів за формулою:

$$q_{пт} = \frac{c_p m (T_{ТАМ2} - T_{ТАМ1})}{m} = c_p (T_{ТАМ2} - T_{ТАМ1}), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}. \quad (1)$$

Розраховані значення питомої теплоакумулюючої здатності в діапазоні 650–700 °С та за середнього коефіцієнта теплоємності матеріалів наведено у табл. 2.

Таблиця 2

**Питома теплоакумулююча здатність та середній коефіцієнт теплоємності досліджуваних матеріалів**

Матеріал	Магнезит	Шамот	Корунд	Динас	Феолит
$c_{\text{ср}}$	1,14	0,95	0,93	0,92	0,92
$q_{\text{пт}}$	663	554	537	532	532

**Експериментальні дослідження.** Проведено експериментальні дослідження динамічних характеристик твердих теплоакумулюючих елементів з магнезиту та шамоту в режимі

заряду та віддачі теплоти ЕТА. Заміри проводили в верхній та нижній зонах теплоакуюючого блоку ЕТА. Температуру фіксували в стінці каналів теплоакуюючих елементів і в тепловій ізоляції ЕТА. Також заміряли температуру нагрітого повітря в каналах теплоакуюючих елементів та на виході із ЕТА. Як первинні перетворювачі температури використовували термопари хромель-алюмель (ТХА) у термостійкій керамічній оболонці. Як вторинний перетворювач використовували універсальний 8-канальний контролер температур УКТ-38.Щ4.ТП. Через адаптер інтерфейсу АС-2 дані надходили на ПК та оброблялись в програмному комплексі Owen Process Manager v 1.2. Докладні результати проведених експериментальних досліджень наведено в [5].

На рис. 6 наведено фотографії теплоакуюючих елементів із шамоту та магнезиту.



а  
б  
Рис. 6. Теплоакуючі елементи ЕТА з магнезиту (а) та шамоту (б)

На основі отриманих експериментальних даних [5] було розраховано кількість акумульованої теплоти елементами ЕТА з магнезиту та шамоту в абсолютних (див. рис. 7) та відносних величинах (див. рис. 8). Кількість акумульованої теплоти в безрозмірній формі визначається відношенням поточної величини акумульованої теплоти в певний момент часу  $\tau$  до максимально можливого її значення  $Q' = Q/Q_{max}$ .

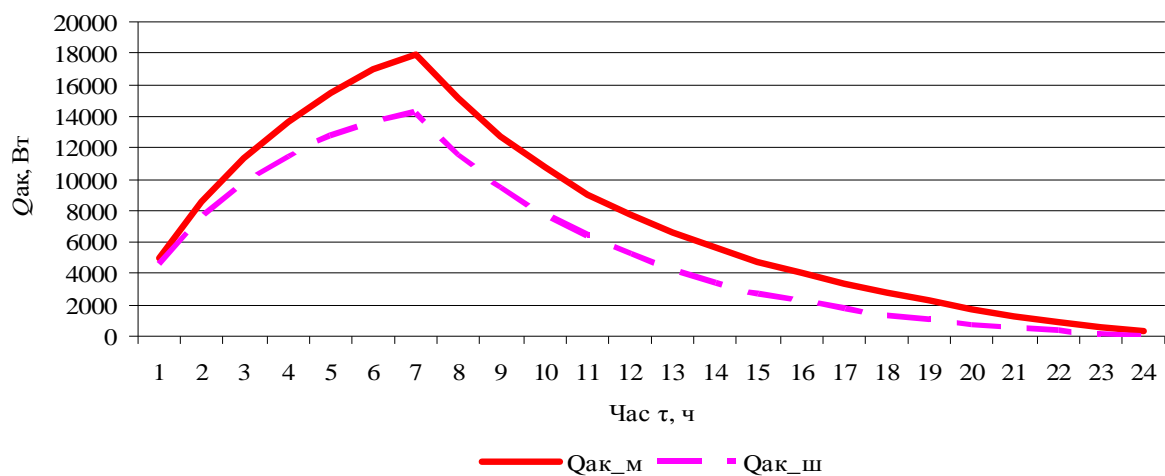


Рис. 7. Кількість акумульованої теплоти в абсолютних величинах у режимі заряду та віддачі теплоти ЕТА: м – магнезит; ш – шамот

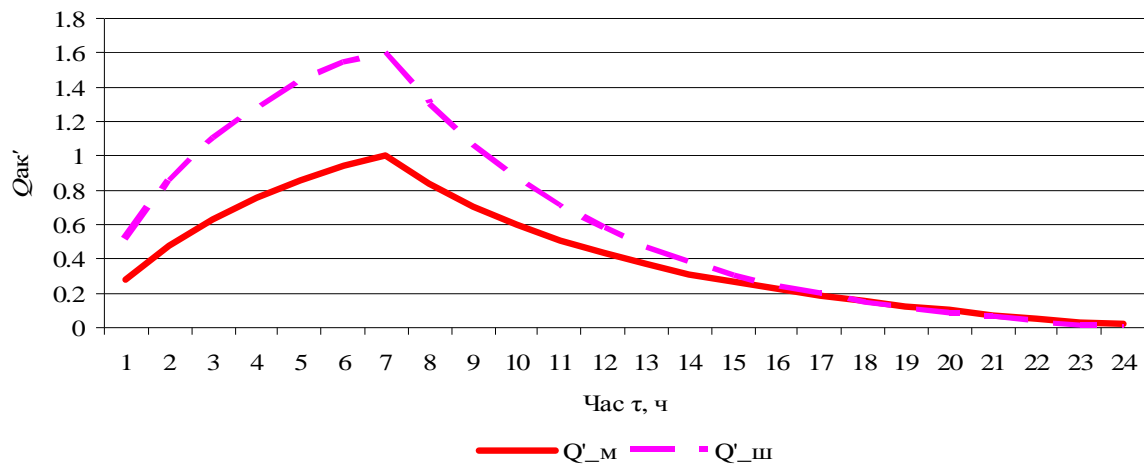


Рис. 8. Кількість акумульованої теплоти у відносних величинах в режимі заряду та віддачі теплоти ЕТА: м – магнезит; ш – шамот

**Висновки.** Виконано теоретичні та експериментальні дослідження динамічних характеристик теплоакumuлюючих елементів із шамоту та магнезиту в режимі заряду та віддачі теплоти ЕТА. Показано, як змінюються теплофізичні характеристики обраних теплоакumuлюючих матеріалів за нагрівання від 70 °С до 650 °С та подальшого охолодження, безрозмірні числа подібності  $Fo$  та  $Vi$  впродовж періоду заряду та віддачі теплоти ЕТА. Найефективнішим матеріалом для використання в ЕТА виявився магнезит. Також в режимі заряду отримано непогані результати за використання шамотних теплоакumuлюючих елементів, що підтверджується отриманими експериментальними даними. Розраховано питому теплоакumuлюючу здатність та кількість акумульованої теплоти досліджуваних матеріалів. Кількість акумульованої теплоти залежить від теплоємності матеріалу, його маси та робочого діапазону температур. Також на ефективність акумулювання теплоти в ЕТА впливає теплова ізоляція, яка теж має певну акумулюючу здатність.

1. Хименко А. В. Эффективность применения теплоакumuлирующих материалов в электрических тепловых аккумуляторах [Текст] / 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. 2. Промышленные печи [Текст]: справ. руководство для расчетов и проектирования / Е. И. Казанцев. – 2-е изд. доп. и перераб. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с. 3. Левенберг В. Д. Аккумулирование тепла [Текст] / В. Д. Левенберг, М. Р. Ткач, В. А. Гольстрем. – К.: Техника, 1991. – 112 с. 4. Хименко А. В. Расчетное и экспериментальное исследование тепловых процессов в твердом теплоакumuлирующем материале с высокими теплоакumuлирующими свойствами [Текст] / А. В. Хименко // 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. 5. Хименко А. В. Исследование динамических характеристик электротепловых аккумуляторов [Текст] / А. В. Хименко // Відновлювальна енергетика. – 2016. – № 2(45). – С. 22–26. – ISSN 1819-8058.