

Шовкалюк М.М., канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-1898-3493

Зименко С.В., магистр, ORCID 0000-0003-4151-0931

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

АНАЛИЗ ТЕПЛОПОТЕРЬ ЧЕРЕЗ ОГРАЖДЕНИЯ С УЧЁТОМ РАЗНЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ

Целью работы является исследование тепловых потоков и анализ тепловых потерь из отапливаемых помещений. В статье проанализирована проблематика вопроса, и принят к рассмотрению конкретный объект исследования, рассмотрены его конструктивные особенности и конкретные теплопроводные включения с помощью различных методик расчета. Рассмотрены методики действующих современных стандартов Украины по расчету теплозащитных свойств ограждающих конструкций здания, с учетом тепловых включений и без них. По результатам исследования определены различия между методиками, рассчитаны ключевые параметры, определены различия между подходами. Результатом исследования является вывод о значительном влиянии тепловых включений на общий уровень теплозащитных свойств ограждающих конструкций и важность правильного выбора методики расчета с учетом существующих данных об объекте. В выводах определено, что методика оценки тепловых потерь с учетом тепловых включений позволяет более точно оценить теплозащитные свойства участка исследования.

Ключевые слова: ограждающие конструкции, тепловая защита, теплопроводные включения.

Надійшла 15.12.2017

Received 15.12.2017

УДК 536.24:697.278

А.В. Хименко, канд. техн. наук, науч. сотр. ORCID 0000-0003-2612-969X

Институт возобновляемой энергетики НАН Украины

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТДАЧИ ТЕПЛОТЫ ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОГО АККУМУЛЯТОРА

Данные, полученные в результате проведения экспериментальных исследований динамических характеристик теплоаккумулирующих элементов из магнезита с каналами целевидной формы, а также теплоаккумулирующих элементов из шамота с воздушными каналами круглой формы в режимах заряда и отдачи теплоты электротеплового аккумулятора (ЭТА), были использованы для оценки эффективности аккумулирования и отдачи теплоты теплоаккумулирующими элементами ЭТА. Определены средний коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности корпуса ЭТА $\alpha_{н_ср}$, а также коэффициент теплоотдачи в каналах теплоаккумулирующих элементов из магнезита и шамота при естественной и вынужденной конвекции $\alpha_{к_ср}$ и $\alpha_{к_ест_ср}$ в режимах заряда и отдачи теплоты ЭТА. Показана динамика отдачи теплоты в каналах теплоаккумулирующих элементов $Q_{к_ср}$ и общей отдачи теплоты Q_0 за весь цикл работы ЭТА. Были также получены аналитические выражения для определения избыточной температуры теплоаккумулирующих элементов из шамота и магнезита в режиме отдачи теплоты ЭТА путем аппроксимации полученных значений темпа охлаждения методом наименьших квадратов с использованием экспоненциальной функции.

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

© А.В. Хименко, 2017

Введение

Приоритетными задачами для энергетики Украины на сегодняшний день являются снижение уровня энергоемкости производства, повышение энергоэффективности систем по выработке тепловой и электрической энергии, замещение природного газа другими видами энергоресурсов, в том числе – полученными из альтернативных источников энергии, а также повышение эффективности использования тепловой энергии потребителями. В Государственной целевой экономической программе энергоэффективности и развития сферы производства энергоносителей из возобновляемых источников энергии и альтернативных видов топлива рекомендуется внедрение электротеплоаккумуляционного отопления в бюджетной сфере и в административных зданиях, как альтернатива газовому отоплению и один из эффективных вариантов решения проблемы повышения эффективности использования тепловой энергии у потребителей. Одним из перспективных видов электротеплоаккумуляционного отопления являются электротепловые аккумуляторы (ЭТА). Применение ЭТА является экономически целесообразным, так как накопление тепловой энергии (аккумуляция) происходит в ночные часы, когда нагрузка энергосистемы минимальна и действуют дифференцированные тарифы, установленные НКРЭ для всех типов потребителей при наличии многозонных счетчиков учета потребленной электроэнергии. Регулируемая отдача теплоты ЭТА происходит в течение суток в соответствии с потребностями потребителя.

Для широкого внедрения ЭТА в качестве систем электроотопления необходимо проведение теоретических и экспериментальных исследований теплофизических свойств твердых теплоаккумулирующих материалов (ТАМ), используемых в ЭТА, а также теплообменных процессов, протекающих в ЭТА в режимах заряда и отдачи теплоты. Также важной задачей является уменьшение стоимости ЭТА за счет использования более дешевых ТАМ украинского производства, чем магнезит и феолит.

В работах [1-3] приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований теплообменных процессов в теплоаккумулирующих элементах ЭТА из магнезита и шамота. Получено распределение температур в нескольких сечениях по высоте теплоаккумулирующего элемента с воздушными каналами щелевидной и круглой формы при скорости воздушного потока в каналах $w = 3$ м/с в режимах заряда (нагрева) и отдачи теплоты ЭТА [1, 2]. Также было получено изменение температуры нагреваемого воздуха в каналах теплоаккумулирующего элемента по высоте в режимах заряда и отдачи теплоты ЭТА. Показано изменение коэффициентов теплоемкости и теплопроводности в зависимости от температуры различных твердых ТАМ, а также на основе полученных экспериментальных данных определено, как изменяется количество аккумулируемой теплоты теплоаккумулирующими элементами из магнезита и шамота в абсолютных и относительных величинах в режимах заряда и отдачи теплоты ЭТА [3]. Для более полной оценки эффективности работы ЭТА предложенной [1, 4] и стандартной конструкции [5] необходимо на основе полученных экспериментальных данных оценить отдачу теплоты ЭТА с теплоаккумулирующими элементами из магнезита и шамота в режимах заряда и отдачи теплоты.

Цель и задачи

Основной целью данной работы является оценка эффективности отдачи теплоты теплоаккумулирующими элементами из магнезита и шамота с воздушными каналами щелевидной и круглой формы соответственно в режимах заряда и отдачи теплоты ЭТА. Для достижения поставленной цели необходимо определить: 1) Коэффициент теплоотдачи в воздушном канале теплоаккумулирующего элемента в режимах заряда и отдачи теплоты, а также от поверхности корпуса ЭТА; 2) Тепловые потери с поверхности корпуса ЭТА путем естественной конвекции и излучения; 3) Тем нагрева и охлаждения теплоаккумулирующих элементов ЭТА из магнезита и шамота.

Материал и результаты исследований

Оценка тепловых потерь от поверхности корпуса ЭТА

На основе полученных экспериментальных данных об изменении температуры $T_{с1}$ ([2], рис. 2 в) на поверхности корпуса ЭТА в режимах заряда и отдачи теплоты рассчитан средний коэффициент теплоотдачи $\alpha_{н,ср}$. Изменение среднего коэффициента теплоотдачи $\alpha_{н,ср}$ от поверхности корпуса в режимах заряда и отдачи теплоты ЭТА при использовании теплоаккумулирующих элементов из магнезита и шамота приведено на рис. 1.

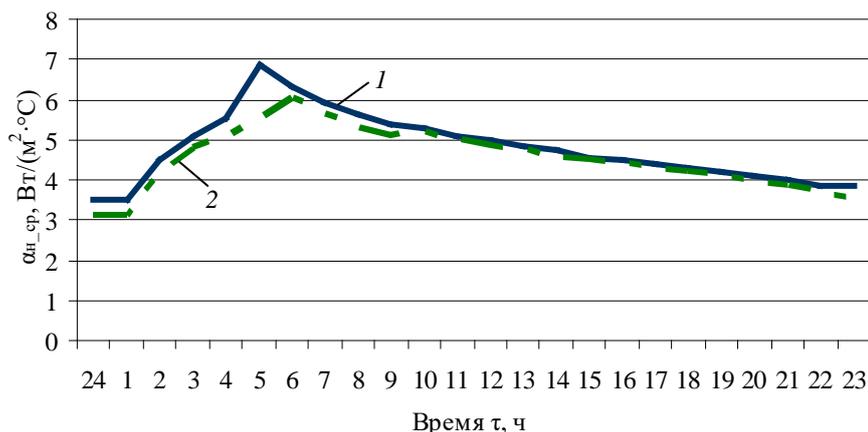


Рисунок 1 – Изменение среднего коэффициента теплоотдачи $\alpha_{н_ср}$ от поверхности корпуса в режимах заряда и отдачи теплоты ЭТА при использовании теплоаккумулирующих элементов из магнезита и шамота: 1 – магнезит; 2 – шамот

Можно отметить, что полученные значения температуры T_{c1} на поверхности корпуса ЭТА с теплоаккумулирующими элементами из магнезита и шамота в результате проведения экспериментальных исследований практически идентичны, поэтому и значения коэффициента теплоотдачи $\alpha_{н_ср}$ (рис. 1) от поверхности корпуса ЭТА для магнезита и шамота также сопоставимы.

При расчете среднего коэффициента теплоотдачи $\alpha_{н_ср}$ от поверхности корпуса ЭТА определялся критерий подобия Gr по формуле (1), далее вычислялся критерия подобия Nu по формуле (2), и находилось соответствующее значение $\alpha_{н_ср}$.

$$Gr = \frac{\beta h^3 g (T_{c1} - T_{ж})}{\nu^2}, \quad (1)$$

где $\beta = \frac{1}{273 + T_{ж}}$, К⁻¹;

h – высота ЭТА, м;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

ν – коэффициент кинематической вязкости для жидкости, м²/с;

$T_{ж}$ – температура окружающего воздуха, °С.

Определяем изменение тепловых потерь $Q_{пот}$ путем естественной конвекции, с учетом среднего коэффициента теплоотдачи $\alpha_{н_ср}$, а также разницы температур T_{c1} и $T_{ж}$, и излучения в режимах заряда и отдачи теплоты от поверхности корпуса ЭТА с теплоаккумулирующими элементами из шамота и магнезита.

Полученные значения тепловых потерь путем естественной конвекции и излучения представлены на рис. 2.

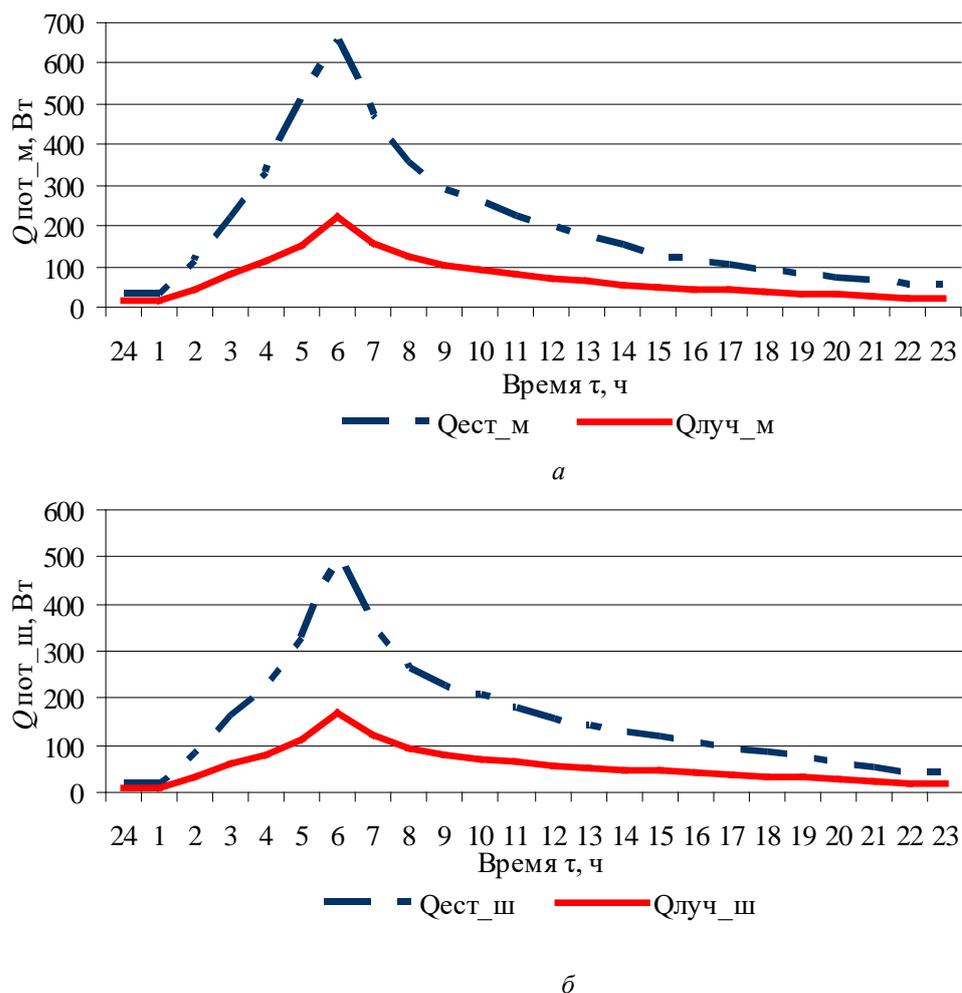


Рисунок 2 – Динамика тепловых потерь $Q_{\text{пот}}$ путем естественной конвекции и излучения в режимах заряда и отдачи теплоты с поверхности корпуса ЭТА с теплоаккумулирующими элементами из магнезита (а) и шамота (б): индекс ш – шамот, индекс м – магнезит

По рис. 2. видно, что тепловые потери путем естественной конвекции значительно превышают тепловые потери путем лучистого теплообмена, как в случае с магнезитовыми теплоаккумулирующими элементами, так и с шамотными. Площадь поверхности корпуса ЭТА $F_{\text{эта}}$ принята в расчетах $1,99 \text{ м}^2$.

Оценка отдачи теплоты ЭТА с теплоаккумулирующими элементами из магнезита и шамота

На основе полученных данных об изменении температуры стенки канала теплоаккумулирующих элементов $T_{\text{ск1}}$ и $T_{\text{ск2}}$ ([2], рис. 2 а, з) и температуры нагреваемого воздуха в каналах теплоаккумулирующих элементов $T_{\text{в_ск1}}$ и $T_{\text{в_ск2}}$ ([2], рис. 2 б, д) в режимах заряда и отдачи теплоты ЭТА рассчитан средний коэффициент теплоотдачи в воздушных каналах теплоаккумулирующих элементов из шамота и магнезита при естественной $\alpha_{\text{к_ест_ср}}$ и вынужденной конвекции $\alpha_{\text{к_ср}}$ (рис. 3).

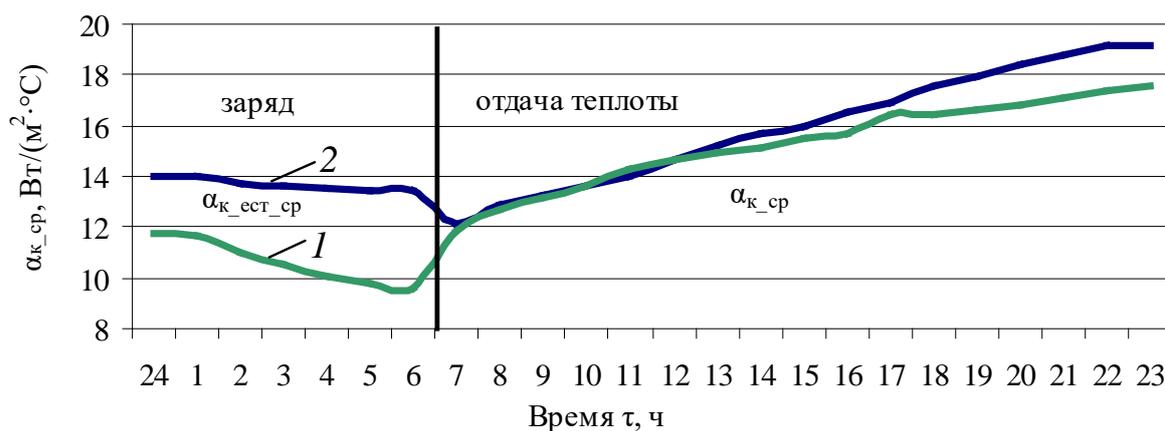


Рисунок 3 – Изменение коэффициента теплоотдачи $\alpha_{к_ест_ср}$ и $\alpha_{к_ср}$ в каналах теплоаккумулирующих элементов из магнезита и шамота в режимах заряда и отдачи теплоты ЭТА: 1 – теплоаккумулирующие элементы из магнезита; 2 – теплоаккумулирующие элементы из шамота

Для расчета среднего коэффициента теплоотдачи при естественной конвекции в воздушных каналах $\alpha_{к_ест_ср}$ использовалось критериальное уравнение для вертикальных поверхностей (труба, пластина) при ламинарном течении жидкости (газов) $10^3 < Gr_{дж} \cdot Pr_{ж} < 10^9$ [6] ввиду отсутствия устойчивых решений для данных условий теплообмена:

$$\overline{Nu} = 0,695 Gr_{дж}^{0,25} . \quad (2)$$

Для расчета среднего коэффициента теплоотдачи при вынужденной конвекции с учетом влияния температурного напора в воздушном канале теплоаккумулирующего элемента использовалось уравнение [7, 8]

$$\overline{Nu} = 0,023 Pr^{0,4} Re^{0,8} \left(\frac{T_{ск}}{T_{в_ск}} \right)^{-0,55} . \quad (3)$$

При расчете среднего коэффициента теплоотдачи в щелевидных каналах (0,19×0,02 м) магнетитовых теплоаккумулирующих элементов в уравнении (3) используется в качестве определяющего размера эквивалентный диаметр канала ($d_{экр} = 0,036$ м). При расчете среднего коэффициента теплоотдачи в каналах теплоаккумулирующих элементов из шамота диаметр канала принимался 0,044 м.

Отмечаются большие значения коэффициента теплоотдачи $\alpha_{к_ест_ср}$ и $\alpha_{к_ср}$ в воздушных каналах теплоаккумулирующих элементов из шамота практически в течение всего периода заряда и отдачи теплоты ЭТА, чем значения коэффициента теплоотдачи в каналах магнетитовых элементов.

Полученные значения $\alpha_{к_ест_ср}$ и $\alpha_{к_ср}$ соответствуют приведенному в [9] диапазону значений коэффициента теплоотдачи при естественной и вынужденной конвекции в трубах и каналах.

Определена средняя отдача теплоты в воздушных каналах теплоаккумулирующих элементов из шамота и магнезита $Q_{к_ср}$, а также общая отдача теплоты Q_0 ЭТА с учетом тепловых потерь излучением и естественной конвекцией от поверхности корпуса ЭТА в режимах заряда и отдачи теплоты ЭТА (рис. 4). При расчете отдачи теплоты в каналах теплоаккумулирующих элементов $Q_{к_ср}$ использовались средние значения температур $T_{ск2_н}$ и $T_{ск2_в}$ ([2], рис. 2 а, з), средние значения температур $T_{в_ск2_н}$ и $T_{в_ск2_в}$ ([2], рис. 2 б, д), а также значения коэффициента теплоотдачи $\alpha_{к_ест_ср}$, $\alpha_{к_ср}$ (рис. 3) и $\alpha_{н_ср}$ (рис. 1). Длина воздушных каналов теплоаккумулирующих элементов из магнезита принята 0,5 м, а для шамотных теплоаккумулирующих элементов – 0,3 м.

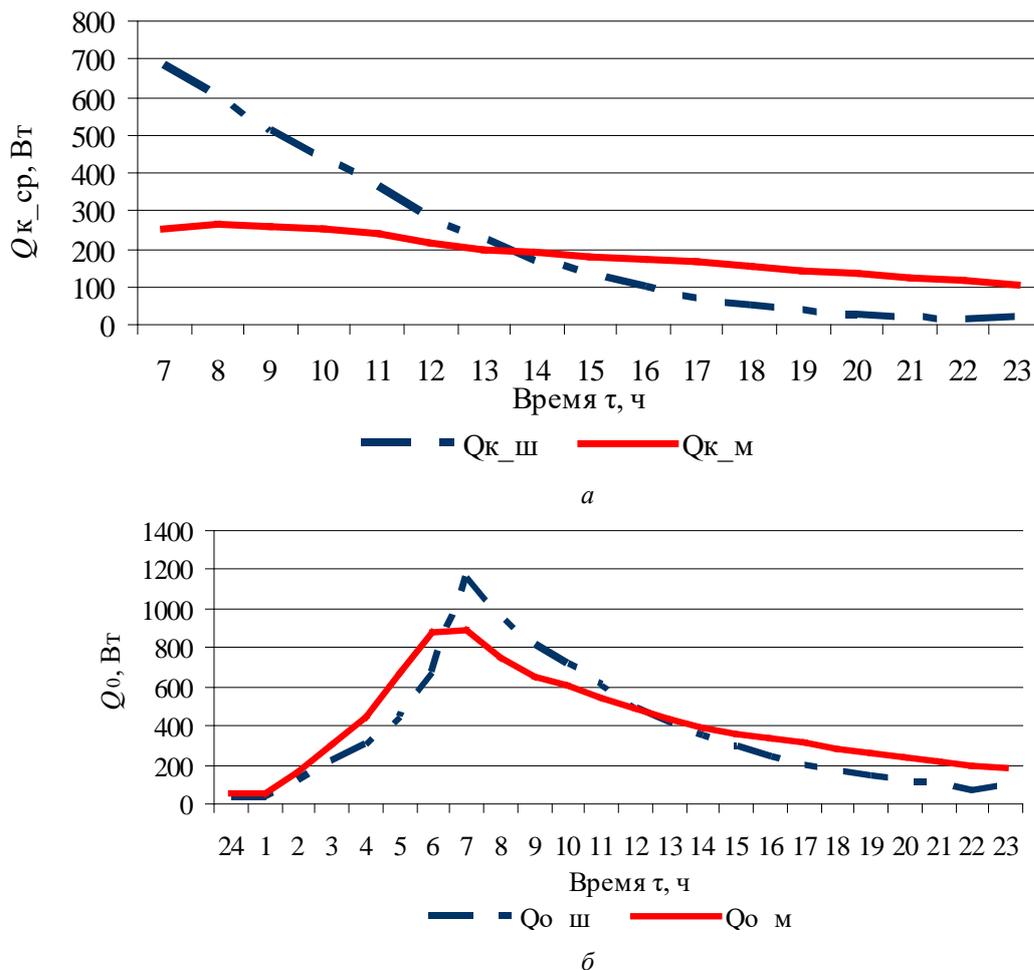


Рисунок 4 – Изменение средней теплоотдачи Q_{k_cp} (a) в воздушных каналах теплоаккумулирующих элементов из магнезита и шамота и общей отдачи теплоты Q_0 (б) с учетом тепловых потерь в режимах заряда и отдачи теплоты ЭТА: индекс ш – шамот, индекс м – магнезит

Теплоаккумулирующие элементы из шамота с каналами круглого сечения обеспечивают бóльшую отдачу теплоты в каналах $Q_{k_ш}$ (на 15 %) по сравнению с магнезитовыми теплоаккумулирующими элементами, у которых наблюдается равномерная, но достаточно низкая отдача теплоты в каналах $Q_{k_м}$ (см. рис. 4 а). Такая же динамика наблюдается и с общей отдачей теплоты Q_0 , которая складывается из $Q_{пот}$ (рис. 2) и Q_{k_cp} (рис. 4 а). Это объясняется большим температурным напором между стенкой воздушного канала и нагреваемым воздухом в канале теплоаккумулирующих элементах из шамота, что и определяет большее значение отдачи теплоты в канале по сравнению с магнезитовыми элементами.

Определим среднелогарифмический температурный напор между стенкой воздушного канала и нагреваемым воздухом в абсолютных и относительных единицах (см. рис. 5).

Среднелогарифмический температурный напор в безразмерной форме определяется отношением текущего значения среднелогарифмического температурного напора в определенный момент времени t к максимально возможному его значению $\Delta T_{лог\ t} / \Delta T_{лог\ max}$ [7]:

$$\Delta T_{лог} = \frac{\Delta T' - \Delta T''}{\ln \frac{\Delta T'}{\Delta T''}}, \quad (4)$$

где $\Delta T'$ и $\Delta T''$ – температурные напоры между стенкой канала и нагреваемым воздухом в канале теплоаккумулирующего элемента в нижнем и верхнем сечениях воздушного канала.

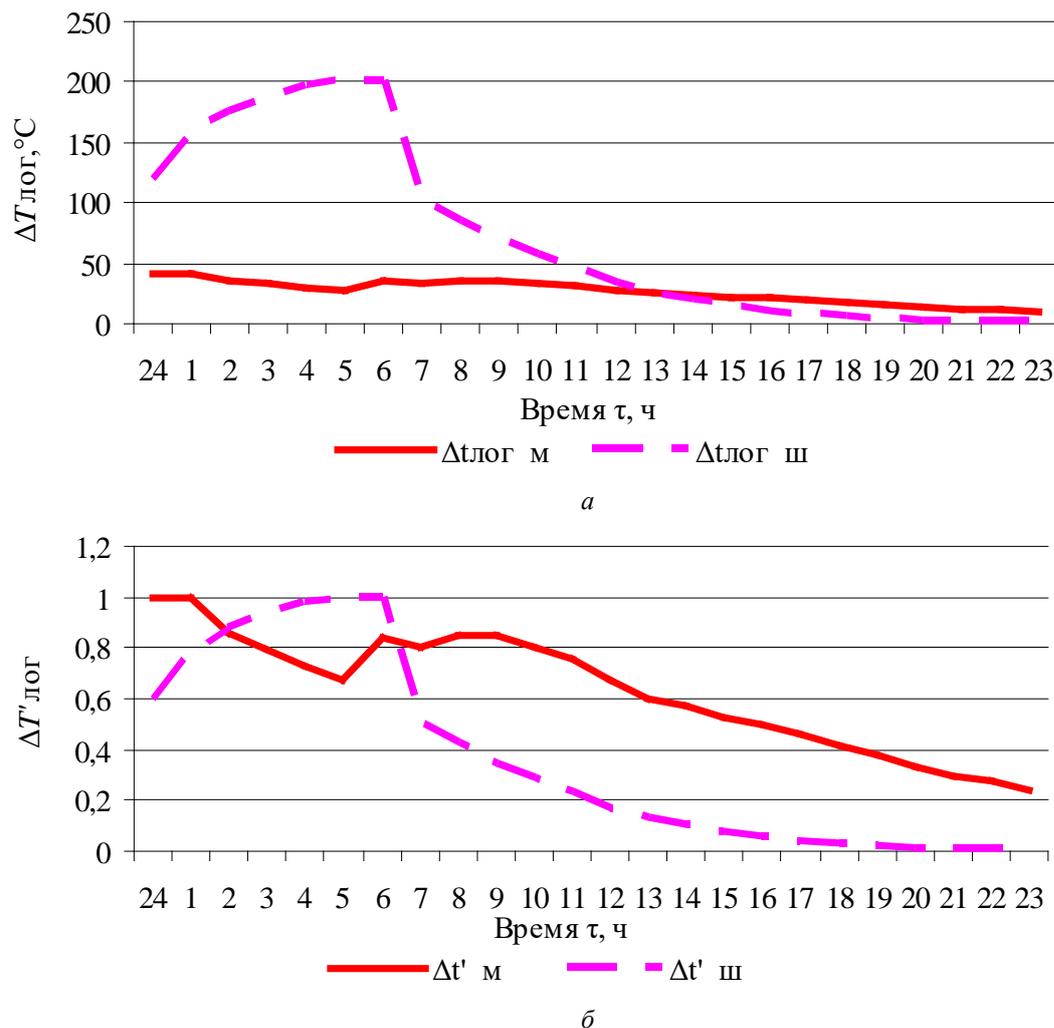


Рисунок 5 – Изменение среднелогарифмического температурного напора в воздушных каналах теплоаккумулирующих элементов из магнезита и шамота в абсолютных (а) и относительных величинах (б) в режимах заряда и отдачи теплоты ЭТА

Можно отметить, что среднелогарифмический температурный напор в воздушных каналах теплоаккумулирующих элементов из шамота больше на 50-150°C в течение 7 часов режима заряда ЭТА и первых 3-х часов режима отдачи теплоты ЭТА (рис. 5) по сравнению с температурным напором в щелевидных каналах теплоаккумулирующих элементов из магнезита, что отражается на более высоком значении отдачи теплоты в канале $Q_{к\text{ш}}$.

Количество аккумулируемой теплоты $Q_{ак}$ рассчитывалось на основе средних значений температур по высоте воздушного канала теплоаккумулирующего элемента $T_{ск2\text{н}}$ и $T_{ск2\text{в}}$ и представлено в [3]. Масса теплоаккумулирующих элементов из магнезита и шамота принималась 62,5 и 58 кг соответственно. Среднее значение коэффициента теплоемкости c_p принимались согласно [10] и в диапазоне температур 50-650°C для магнезита составляет 1,14 кДж/(кг·°C), а для шамота – 0,94 кДж/(кг·°C). Максимальное значение $Q_{ак}$ в конце режима заряда ЭТА с теплоаккумулирующими элементами из магнезита составляет 11300 Вт, а с теплоаккумулирующими элементами из шамота соответственно 9300 Вт. Более низкие значения коэффициентов теплоемкости, теплопроводности и плотности шамота определяют меньшее значение $Q_{ак}$ в режимах заряда и отдачи теплоты ЭТА по сравнению с магнезитом [10].

Определение темпа нагрева и охлаждения. Оценка эффективности аккумуляции теплоты теплоаккумулирующими элементами ЭТА

Для анализа динамики и эффективности отдачи теплоты ЭТА определим средний темп охлаждения теплоаккумулирующих элементов из магнезита и шамота по следующей зависимости (первая теорема Кондратьева), используя значения $\alpha_{к_ср}$ и $\alpha_{к_ест_ср}$

$$m = \psi \frac{\alpha_{к_ср} F_k}{c_{p1} \rho_1 V_{ТАМ}}, \quad (5)$$

где F_k – площадь поверхности воздушного канала, м²;

c_{p1} – теплоемкость ТАМ, Дж/(кг·°C);

ρ_1 – плотность теплоаккумулирующего материала, кг/м³;

$V_{ТАМ}$ – объем теплоаккумулирующих элементов, м³;

ψ – коэффициент неравномерности распределения температуры в теплоаккумулирующем элементе (принят 0,7).

Рассчитанный средний темп охлаждения теплоаккумулирующих элементов на основе полученных экспериментальных данных $m_m = 9,28 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ и $m_{ш} = 1,54 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ подтверждают динамику изменения температуры теплоаккумулирующих элементов из магнезита и шамота в режиме отдачи теплоты ЭТА ([2], рис. 2 а, з). Темп нагрева теплоаккумулирующих элементов из магнезита меняется в течение режима заряда ЭТА от $3,39 \cdot 10^{-4}$ до $1,94 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, а для теплоаккумулирующих элементов из шамота – от $7,22 \cdot 10^{-4}$ до $1,39 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. Темп нагрева теплоаккумулирующих элементов определяется как отношение разности натуральных логарифмов избыточных температур ϑ_c к разности двух моментов времени τ [6]

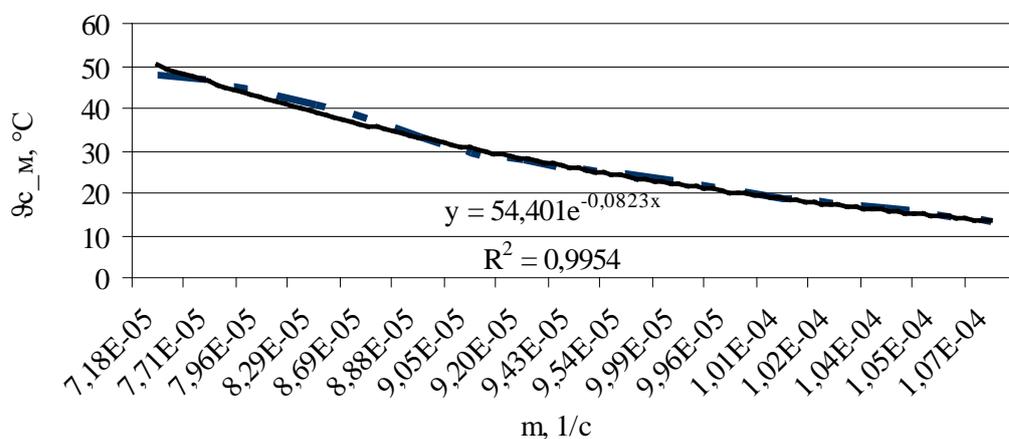
$$m = \frac{\ln \vartheta_2 - \ln \vartheta_1}{\tau_2 - \tau_1}, \quad (6)$$

где $\ln \vartheta_1$ и $\ln \vartheta_2$ – натуральные логарифмы избыточной температуры ϑ теплоаккумулирующих элементов для двух моментов времени τ_1 и τ_2 .

Также получены аналитические выражения для определения избыточной температуры теплоаккумулирующих элементов из шамота и магнезита в режиме отдачи теплоты ЭТА путем аппроксимации полученных значений темпа охлаждения методом наименьших квадратов с использованием экспоненциальной функции (см. рис. 6).

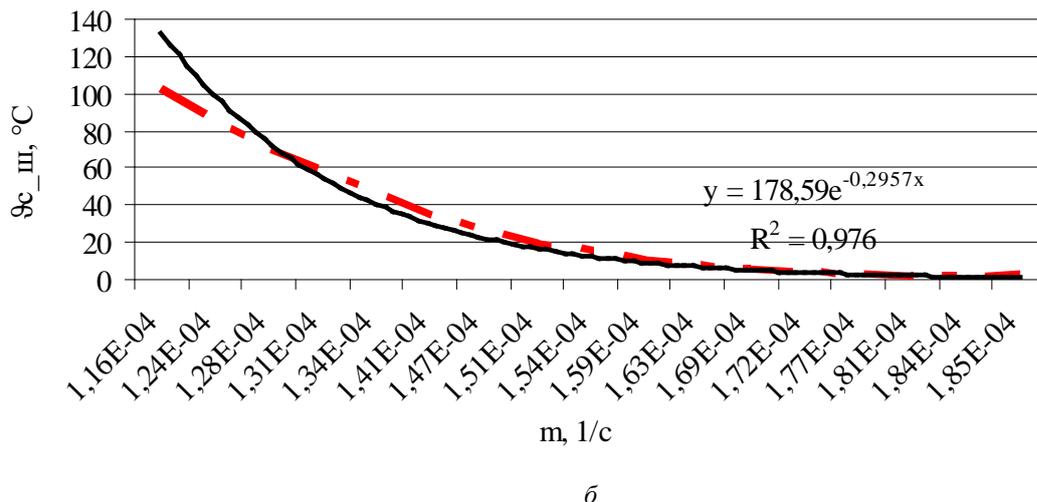
$$\vartheta_M = 54,401e^{-0,0823\tau}, \quad (7)$$

$$\vartheta_{Ш} = 178,59e^{-0,2957\tau}. \quad (8)$$



а

Рисунок 6 – Изменение избыточной температуры ϑ_c в зависимости от темпа охлаждения теплоаккумулирующих элементов из магнезита (а)



Продолжение рис. 6. Изменение избыточной температуры θ_c в зависимости от темпа охлаждения теплоаккумулирующих элементов из шамота (δ) в режиме отдачи теплоты ЭТА:
индекс м – магнезит, индекс ш – шамот

Определена безразмерная избыточная температура θ'_c теплоаккумулирующих элементов из магнезита и шамота в режимах заряда и отдачи теплоты ЭТА по формуле [11]

$$\theta'_c = \frac{T_{\text{ск2}} - T_{\text{в_ск2}}}{T_{\text{в_ск2}} - T_{\text{ск2,0}}} \quad (9)$$

Результаты расчета θ'_c представлены на рис. 7.

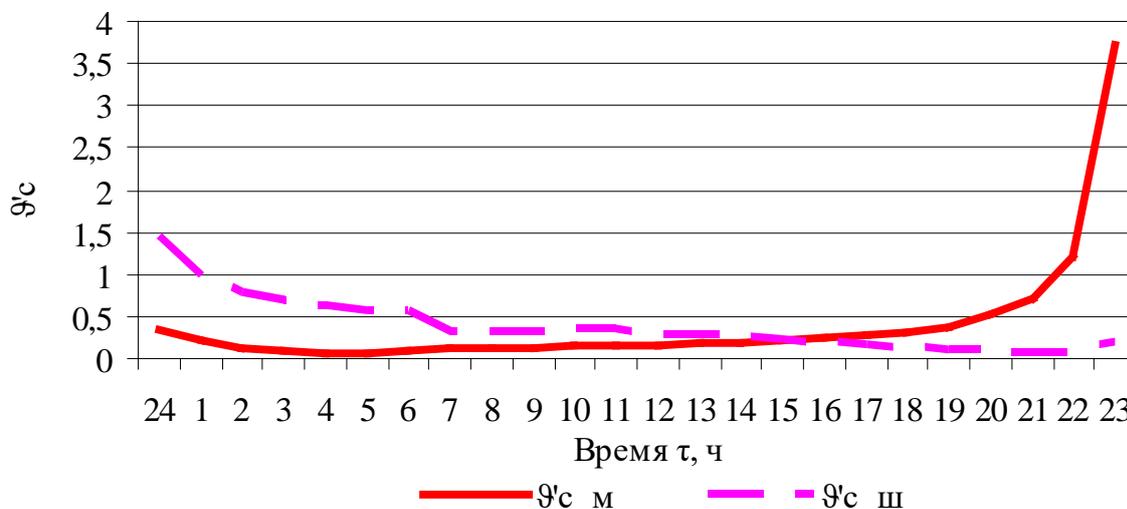


Рисунок 7 – Изменение безразмерной избыточной температуры θ'_c в режимах заряда и отдачи теплоты ЭТА для теплоаккумулирующих элементов из шамота и магнезита

Можно отметить, что наибольшие значения безразмерной избыточной температуры θ'_c наблюдаются в режиме заряда ЭТА с шамотными теплоаккумулирующими элементами и в последние 4 часа режима отдачи теплоты ЭТА с магнезитовыми теплоаккумулирующими элементами. Это объясняется наибольшим температурным напором между стенкой воздушного канала и нагреваемым воздухом в канале в указанные периоды работы ЭТА (см. [2], рис. а, б, в, д).

Эффективность отдачи теплоты теплоаккумулирующими элементами ЭТА из магнезита и шамота можно определить из отношения

$$k_{\text{эф}} = \frac{Q_0}{Q_{\text{ак}}}, \quad (10)$$

где $Q_{\text{ак}}$ – максимальное количество аккумулируемой теплоты теплоаккумулирующими элементами в конце периода заряда ЭТА (см. рис. 4 а);

Q_0 – максимальное количество общей отдаваемой теплоты ЭТА (см. [3], рис. 7).

Эффективность отдачи теплоты стандартными теплоаккумулирующими элементами из магнезита со щелевидными каналами, рассчитанная по формуле (10), составляет 0,85, а для шамотных элементов с круглыми каналами составляет 0,94.

Выводы

На основе анализа и обобщения полученных экспериментальных данных определены средний коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности корпуса ЭТА $\alpha_{\text{н. ср.}}$, а также средний коэффициент теплоотдачи в каналах теплоаккумулирующих элементов из магнезита и шамота при естественной и вынужденной конвекции $\alpha_{\text{к. ср}}$ и $\alpha_{\text{к. ест. ср.}}$. Получены значения средней отдачи теплоты в каналах теплоаккумулирующих элементов $Q_{\text{к. ср}}$ и общей отдачи теплоты Q_0 ЭТА, а также аналитические выражения для определения избыточной температуры теплоаккумулирующих элементов из шамота и магнезита с учетом их темпа охлаждения в режиме отдачи теплоты ЭТА. Показана большая эффективность теплоаккумулирующих элементов из шамота с каналами круглой формы в режиме отдачи теплоты ЭТА по сравнению с более дорогими теплоаккумулирующими элементами из магнезита с каналами щелевидной формы.

Полученные тепловые характеристики ЭТА с магнезитовыми и шамотными теплоаккумулирующими элементами необходимы для выявления факторов, влияющих на характер и динамику нагрева и охлаждения теплоаккумулирующих элементов, а также для выдачи рекомендаций по выбору эффективных ТАМ и методике теплотехнического расчета ЭТА.

Список использованной литературы

1. Хименко А.В. Расчетное и экспериментальное исследование тепловых процессов в твердом теплоаккумулирующем материале с высокими теплоаккумулирующими свойствами / А.В. Хименко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – №10 (1182). – С. 44-49. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-774X. – doi:10.20998/2078-774X.2016.10.06.
2. Хименко А.В. Исследование динамических характеристик электротепловых аккумуляторов / А.В. Хименко // Відновлювана енергетика. – 2016. – №2 (45). – С. 22-26. – ISSN 1819-8058.
3. Хіменко О.В. Оцінка ефективності акумулювання теплоти твердими теплоаккумулюючими 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.
4. Тарасова В.А. Выбор рациональных геометрических параметров элемента электрического теплового аккумулятора / В.А. Тарасова, А.В. Хименко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХП», 2013. – №13 (987). – С. 110-115. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2078-774X.
5. Мацевитый Ю.М. Оценка энергетической эффективности систем электротеплоаккумуляционного отопления административных зданий / Ю.М. Мацевитый, Н.Г. Ганжа, А.В. Хименко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2011. – №10. – С. 9-16. – ISSN 2218-1849.
6. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
7. Исаченко В.П. Теплопередача: учебник для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
8. Кутателадзе С.С. Справочник по теплопередаче / С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский. – М.: Госэнергоиздат, 1958. – 400 с.
9. Теплотехника: учеб. для вузов / Н.Н. Ларинов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1985. – 432 с.
10. Промышленные печи: справ. руководство для расчетов и проектирования / Е.И. Казанцев. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.
11. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена / С.С. Кутателадзе. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.

A. Khimenko, ORCID 0000-0003-2612-969X

Renewable Energy Institute of the NAS of Ukraine

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF THE HEAT TREATMENT BY HEAT-ACCUMULATING ELEMENTS OF THE ELECTRIC HEAT ACCUMULATOR

On the basis of experimental and numerical studies of heat transfer processes in solid heat storage elements made of magnesite with the slit-like channels, and also the heat storage elements of chamotte with the air channels of circular cross-section in the charge mode and the heat output mode of electric thermal storage (ETS), the efficiency of storage and heat output of ETS was estimated. The average coefficients of heat transfer from the outer surface of the ETS housing and heat transfer coefficients in the channels of heat storage elements from magnesite and chamotte for natural and forced convection were determined. The values of the average heat output in the channels of heat storage elements Q_{ch_med} and the full heat output Q_0 ETS are obtained. The average log temperature temperature difference ΔT_{log} was determined between the air channel wall and the heated air in the channel in absolute and relative units. The calculated average values of the rate of cooling of the heat storage elements on the basis of the experimental data obtained are $m_m = 9,28 \cdot 10^{-5} s^{-1}$ and $m_{ch} = 1,54 \cdot 10^{-4} s^{-1}$ confirm the dynamics of the temperature change of heat storage elements from magnesite and chamotte in the output mode of ETS in the process of experimental studies. Analytic expressions were also obtained for determining the excess temperature of heat storage elements from chamotte and magnesite in the heat output mode of ETS by approximating the obtained values of the cooling rate by the least squares method using the exponential function. The dimensionless excess temperatures ϑ_{ch}' of heat storage elements from magnesite and chamotte in the modes of charge and output of ETS are determined, and also the efficiency of ETS with standard heat storage elements from magnesite with slit-like channels $k_{ef} = 0,85$ and with chamotte elements and round channels $k_{ef} = 0,94$. The construction of ETS with chamotte heat storage elements and round air channels allows to increase by 15 % the heat output in the channels of heat storage elements.

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

References

1. Khimenko A.V. Computational and experimental research of thermal processes in solid heat storage materials with high thermal storage properties / A.V. Khimenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – №10 (1182). – P.44-49. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2078-774X.
2. Khimenko A.V. Study of dynamic characteristics of electric thermal storages / A.V. Khimenko // Renewable energy. – 2016. – №2 (45). – P. 22-26. – ISSN 1819-8058.
3. Khimenko A.V. Evaluation of the efficiency heat storage of solid heat storage elements of electric thermal storage / A.V. Khimenko // Bulletin of the Lviv Polytechnic National University. Series: Theory and practice of construction. – Lviv : NU "Lviv Polytechnic", 2016. – №844. – P.210-215. – ISSN 0321-0499.
4. Tarasova V.A. The choice of rational geometric parameters of the element of the electric thermal storage / V.A. Tarasova, A.V. Khimenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2013. – №13 (987). – P.110-115. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2078-774X.
5. Matsevity Yu.M. Evaluation of energy efficiency of systems electric thermal storage heating of civil building / Yu.M. Matsevity, N.G. Ganja, A.V. Khimenko // Energy saving. Power engineering. Energy audit. – 2011. – №10. – C. 9-16. – ISSN 2218-1849.
6. Mikheev M.A. Fundamentals of heat transfer / M.A. Mikheev, I.M. Mikheeva. – Moscow: Energia, 1977. – 344 p.
7. Isachenko V.P. Heat Transfer. Textbook for universities / V.P. Isachenko, V.A. Osipova, A.S. Sukomel. – 3rd ed., rev. and suppl. – Moscow: Energia, 1975. – 488 p.
8. Kutateladze S.S. Handbook of heat transfer / S.S. Kutateladze, V.M. Borishansky. – Moscow: Gosenergoizdat, 1958. – 400 p.
9. Heat engineering: Textbook for universities / N.N. Larikov. – 3rd ed., rev. and suppl. – Moscow: Stroiizdat, 1985. – 432 p.
10. Industrial Furnaces: Reference guide for calculations and designing / E.I. Kazantsev. – 2nd ed., suppl. and rev. – Moscow: Metallurgy, 1975. – 368 p.
11. Kutateladze S.S. Fundamentals of the theory of heat transfer / S.S. Kutateladze. – 5th ed., rev. and suppl. – Moscow: Atomizdat, 1979. – 416 p.

А В. Хіменко, канд. техн. наук, наук. співроб, ORCID 0000-0003-2612-969X
Інститут відновлюваної енергетики НАН України

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВІДДАЧІ ТЕПЛОТИ ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ ЕЛЕКТРОТЕПЛООВОГО АКУМУЛЯТОРА

Дані, отримані в результаті проведення експериментальних досліджень динамічних характеристик теплоакumuлюючих елементів з магнезиту з каналами щілиноподібної форми, а також теплоакumuлюючих елементів з шамоту з повітряними каналами круглої форми в режимах заряду і віддачі теплоти електротеплового акумулятора (ЕТА), були використані для оцінки ефективності акумуляції та віддачі теплоти теплоакumuлюючими елементами ЕТА. Визначено середній коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні корпусу ЕТА $\alpha_{н\text{ ср}}$, а також коефіцієнт тепловіддачі в каналах теплоакumuлюючих елементів з магнезиту і шамоту при природній і вимушеній конвекції $\alpha_{к\text{ ср}}$ та $\alpha_{к\text{ пр ср}}$ в режимах заряду і віддачі теплоти ЕТА. Показана динаміка віддачі теплоти в каналах теплоакumuлюючих елементів $Q_{к\text{ ср}}$ і загальної віддачі теплоти Q_0 за весь цикл роботи ЕТА. Були також отримані аналітичні вирази для визначення надлишкової температури теплоакumuлюючих елементів з шамоту і магнезиту в режимі віддачі теплоти ЕТА шляхом апроксимації отриманих значень темпу охолодження методом найменших квадратів з використанням експоненціальної функції.

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

Надійшла 01.12.2017

Received 01.12.2017