

УДК 536.242:662.995

А. В. ХИМЕНКО, ведущий инженер Института возобновляемой энергетики
НАН Украины, Киев

ОЦЕНКА И АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ТВЕРДЫХ ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В РЕЖИМЕ ЗАРЯДА И ОТДАЧИ ТЕПЛА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕПЛООВОГО АККУМУЛЯТОРА

Проведено расчетное исследование нестационарного теплового режима теплоаккумулирующего элемента электрического теплового аккумулятора (ЭТА) предложенной конструкции. Проанализирована динамика нагрева и остывания теплоаккумулирующего элемента. Выполнена оценка и сравнение тепловой эффективности теплоаккумулирующих элементов предложенной конструкции с элементами стандартной конструкции. Предложены математические зависимости для расчета температуры теплоаккумулирующего элемента в течение периода заряда и отдачи тепла ЭТА.

Ключевые слова: электрический тепловой аккумулятор, теплоаккумулирующий элемент, режим заряда и отдачи тепла, тепловая эффективность, аккумулирующая способность.

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 на 2010–2015 гг. рекомендовано внедрение электрического теплоаккумуляционного отопления в бюджетной сфере (детсады, школы, ВУЗы и т.д.) и в административных зданиях, как один из эффективных вариантов решения проблемы повышения эффективности систем теплоснабжения потребителей. Для широкого внедрения систем теплоаккумуляционного отопления необходимо исследование тепловых процессов, протекающие в электрическом тепловом аккумуляторе (ЭТА) в режиме заряда и отдачи тепла с последующей выдачей рекомендаций по выбору теплоаккумулирующего материала, расчету геометрических и тепловых параметров ЭТА.

1 Постановка задачи исследования

В работах [1, 2] приведены расчетные исследования температурного поля стандартного теплоаккумулирующего элемента ЭТА. В [1] проанализирована динамика изменения температуры теплоаккумулирующего элемента при двух режимах работы ЭТА и выбран более рациональный режим. Проведена оценка экономических и энергетических затрат при использовании систем отопления с ЭТА и электрическими отопительными приборами конвективного типа. В [2] предложен вариант изменения схемы движения воздушного потока по каналам ЭТА и усовершенствования конструкции теплоаккумулирующего элемента. Выполнен расчет тепловых параметров нагреваемого воздуха при постоянной скорости движения воздушного потока для каждой из предложенных схем теплоаккумулирующего элемента и выбрана более рациональная схема.

В приведенных работах не в полной мере рассмотрены тепловые процессы, протекающие в теплоаккумулирующих элементах предложенной конструкции в режиме заряда и отдачи тепла ЭТА.

© А.В. Хименко, 2014

Следует проанализировать динамику нагрева и охлаждения теплоаккумулирующего элемента при снижении величины теплового потока $q_{ТЭН}$ с поверхности трубчатых электронагревателей (ТЭН) и оценить теплоотдачу стенки воздушного канала теплоаккумулирующего элемента предложенной конструкции для выбранного диапазона скоростей движения воздушного потока.

Целью данной работы является оценка теплового потенциала ЭТА при работе с теплоаккумулирующими элементами предложенной конструкции, а также сопоставление полученных результатов с тепловыми параметрами ЭТА при его работе со стандартными теплоаккумулирующими элементами.

2 Оценка тепловой эффективности твердых теплоаккумулирующих элементов выбранной конструкции

На основе проведенного математического моделирования нестационарных теплообменных процессов в теплоаккумулирующих элементах с различной формой и количеством воздушных каналов при условии равенства площади поперечного сечения данных каналов выбрана более рациональная схема теплоаккумулирующего элемента ЭТА с двумя каналами круглого сечения [2]. Схема движения воздушного потока по каналам теплоаккумулирующих элементов и горизонтальное сечение теплоаккумулирующего элемента представлены на рис. 1.

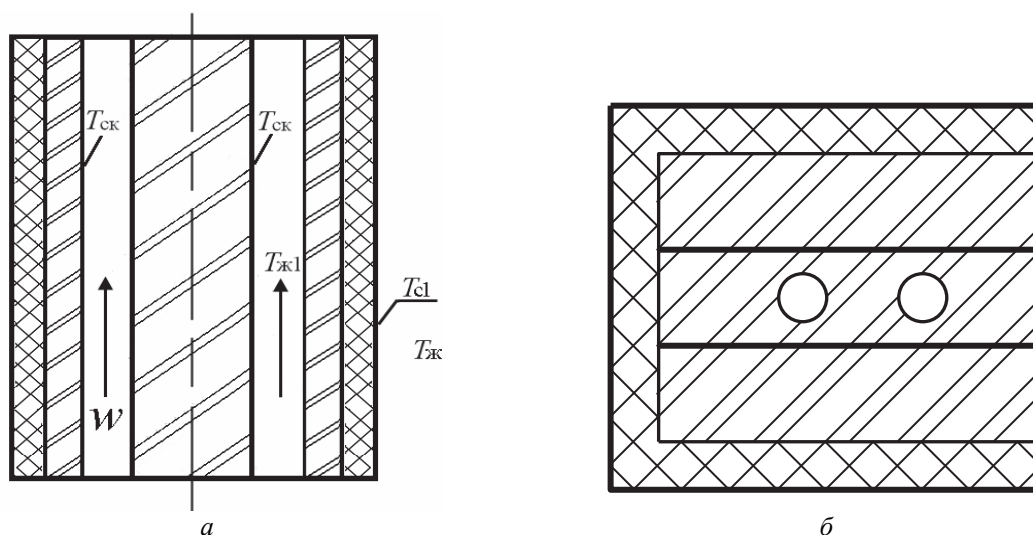


Рис. 1 – Схема движения воздушного потока по каналам теплоаккумулирующего элемента *а* и схема теплоаккумулирующего элемента предложенной конструкции *б*

Проведем расчетное исследование теплового режима теплоаккумулирующего элемента предложенной конструкции из магнезита в течение 48 часов для 3 случаев, когда скорость воздушного потока ω в канале равна 2; 2,5 и 3 м/с, а также при условии ограничения температуры теплоаккумулирующего элемента в конце периода заряда до 650 °С. Подробное описание математической модели, задания начальных и граничных условий и причины ограничения максимальной температуры в период заряда ЭТА также приведены в [2]. Полученные результаты математического моделирования теплообменных процессов в теплоаккумулирующем элементе предложенной конструкции при заданных условиях в течение периода заряда и отдачи тепла приведены на рис. 2.

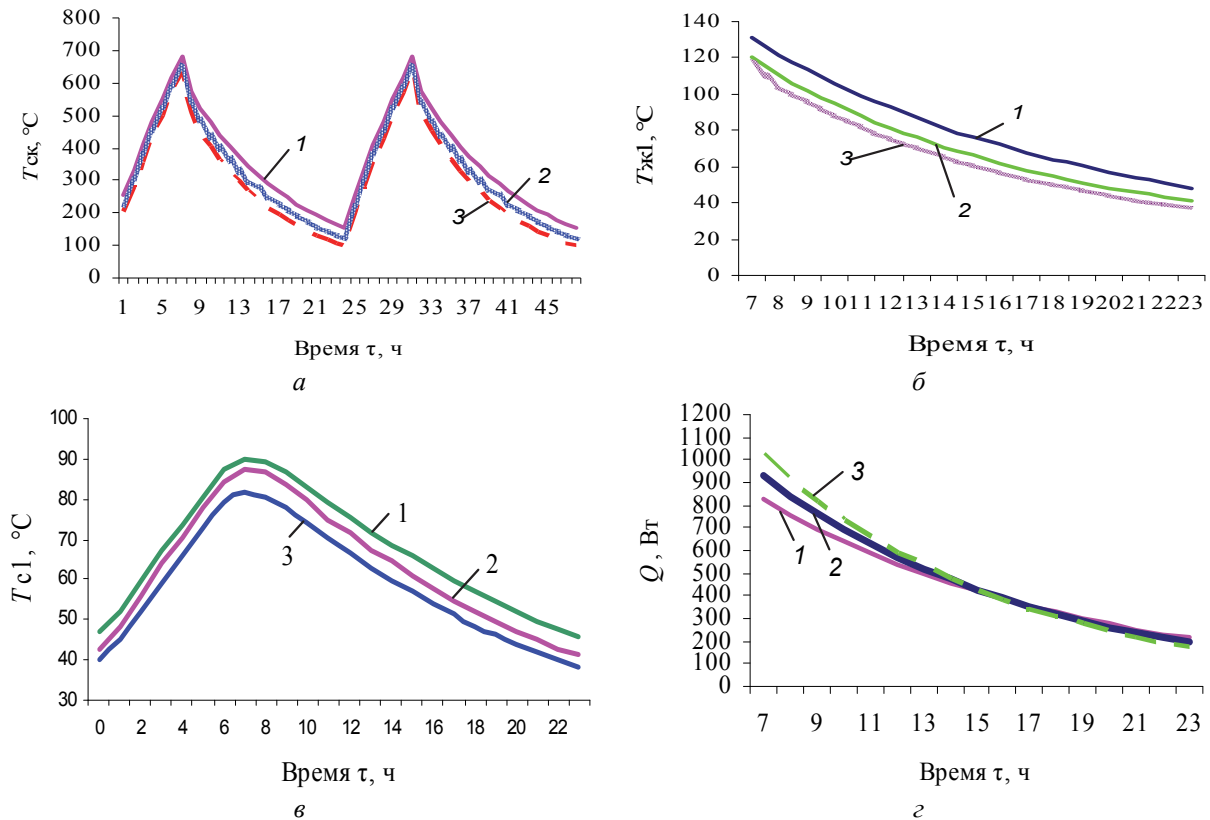


Рис. 2 – Тепловые параметры ЭТА при его работе с теплоаккумулирующими элементами предложенной конструкции: *а* – изменение температуры $T_{СК}$ на стенке канала теплоаккумулирующего элемента; *б* – изменение температуры нагреваемого воздуха $T_{ж1}$ на выходе из теплоаккумулирующих элементов в режиме отдачи тепла; *в* – изменение температуры $T_{с1}$ на наружной поверхности теплоизоляции теплоаккумулирующих элементов); *г* – тепловой поток Q от стенки канала теплоаккумулирующего элемента к потоку нагреваемого воздуха в режиме отдачи тепла:
 1 – при $\omega = 2$ м/с; 2 – при $\omega = 2,5$ м/с; 3 – при $\omega = 3$ м/с

Диапазон скоростей ω выбран исходя из ограничения уровня шума в помещениях жилых и общественных зданий [3] и ограничения скорости воздуха в рабочей зоне [4]. Установлено также, что при снижении скорости воздушного потока в канале до 1,5 м/с и ниже наблюдается ламинарный вязкостно-гравитационный режим течения жидкости при котором коэффициент теплоотдачи α_k в течение периода отдачи тепла ЭТА меняется незначительно и составляет 6,6–6,8 Вт/(м²·°С). Расчет нестационарного температурного поля проводился с учетом изменения температуры нагреваемого воздуха $T_{ж1}$ по высоте канала, изменения теплофизических свойств теплоаккумулирующего материала в зависимости от температуры, а также был учтен конвективный и лучистый теплообмен с окружающей средой при расчете температуры $T_{с1}$ на наружной поверхности теплоизоляции теплоаккумулирующих элементов. Аналогичные расчеты при $\omega = 2$ –3 м/с были проведены и для теплоаккумулирующего элемента стандартной конструкции. В работе [2] также были проведены подобные расчетные исследования теплового режима рассматриваемых теплоаккумулирующих элементов, но только при скорости воздушного потока в канале $\omega = 3$ м/с. Также не было учтено изменение теплофизических свойств теплоаккумулирующего материала в зависимости от температуры. Таким образом, полученные значения тепловых

параметров $T_{СК}$, $T_{ж1}$, $T_{с1}$ и Q более точно отображают тепловые процессы, протекающие в теплоаккумулирующих элементах в режиме заряда и отдачи тепла ЭТА.

3 Анализ и сравнение динамики нагрева и остывания рассматриваемых теплоаккумулирующих элементов

Анализ полученных значений тепловых параметров на основе проведенного математического моделирования тепловых режимов теплоаккумулирующего элемента предложенной конструкции и сопоставления их с аналогичными тепловыми параметрами, полученными для теплоаккумулирующего элемента стандартной конструкции, позволяет сделать вывод о тепловой эффективности предложенной конструкции теплоаккумулирующего элемента. Так, температура стенки воздушного канала теплоаккумулирующего элемента $T_{СК}$ в конце периода отдачи тепла (рис. 2а) при $\omega = 3$ м/с и суммарная величина Q за период отдачи тепла (рис. 2г) в 2,2 раза выше, чем аналогичные значения рассматриваемых параметров для теплоаккумулирующего элемента стандартной конструкции ($T_{СК}$ равны 100 и 45 °С, суммарное значение Q 8343 и 3821 Вт соответственно). Такое соотношение полученных тепловых параметров прослеживается и при $\omega = 2-2,5$ м/с. Полученные результаты достигаются благодаря изменению схемы движения воздуха по каналам теплоаккумулирующих элементов, изменению расположения и формы воздушных каналов (рис. 1) при условии обеспечения эквивалентности общей площади поперечного сечения воздушных каналов и объема сравниваемых теплоаккумулирующих элементов. Предложенные изменения позволяют увеличить расход нагреваемого воздуха $G_{возд}$ соответственно увеличив значения Q в период отдачи тепла ЭТА, а также получить более высокую температуру $T_{СК}$ в конце периода отдачи тепла, что дает возможность достичь максимальной температуры в конце периода заряда ЭТА (примерно 650 °С) при уменьшении теплового потока с поверхности ТЭН на 30 % за такой же промежуток времени по сравнению с вариантом, когда происходит нагрев теплоаккумулирующего элемента стандартной конструкции. Таким образом, использование предложенной конструкции теплоаккумулирующих элементов в ЭТА позволит снизить мощность ТЭН и соответственно сократить потребление электроэнергии.

Полученные коэффициенты теплоотдачи α_k от стенки канала рассматриваемого теплоаккумулирующего элемента к потоку нагреваемого воздуха в период отдачи тепла представлены на рис. 3.

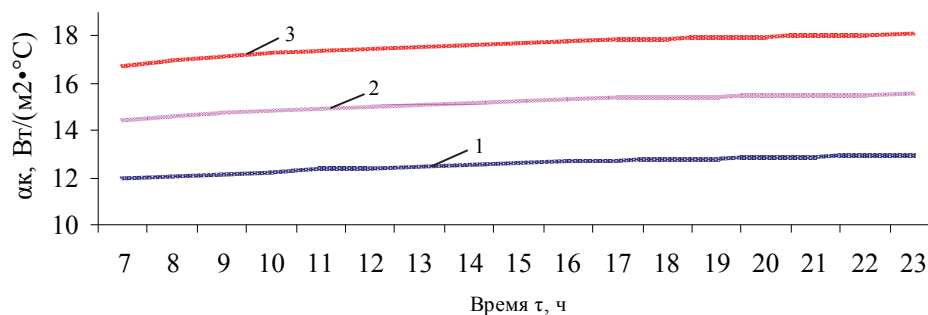


Рис. 3 – Изменение коэффициента теплоотдачи α_k в периода отдачи тепла:
1 – при $\omega = 2$ м/с; 2 – при $\omega = 2,5$ м/с; 3 – при $\omega = 3$ м/с

Аналогичные значения величины α_k , полученные для теплоаккумулирующего элемента стандартной конструкции, ниже на (7–10) %. Различие между полученными

величинами обусловлено влиянием геометрического размера воздушного канала $\alpha_k \sim d_{\text{эКВ}}^{-0,2}$ и коэффициентом ε_l , учитывающим изменение среднего α_k по высоте канала [5]. Коэффициент теплоотдачи α_k в течение периода отдачи тепла (рис. 3) меняется незначительно и для расчетов его можно принять постоянным. Таким образом, можно утверждать, что в данном случае имеет место регулярный тепловой режим II рода (квазистационарный).

На основе анализа распределения температуры $T_{\text{СК}}$ в течение периода заряда и отдачи тепла ЭТА были предложены математические зависимости, которые с достаточной точностью описывают рассматриваемые тепловые процессы в теплоаккумулирующем элементе. Погрешность при расчете температуры $T_{\text{СК}}$ в период заряда и отдачи тепла ЭТА составила (3–5) %.

$$T_{\text{СК } \tau_0} = T_{\text{СК } \tau_0 - 1} e^{-m\tau_0} (0,92 - 0,94); \quad (1)$$

$$q_{\text{ТЭН}} = \frac{\lambda_1}{\delta} \left(T_{\text{СК } \tau_n} - T_{\text{СК } \tau_n - 1} \right) (0,92 - 0,94), \quad (2)$$

где $T_{\text{СК } \tau}$ – температура стенки канала теплоаккумулирующего элемента в момент времени τ (конечная), °С; $T_{\text{СК } \tau - 1}$ – то же в момент времени $\tau - 1$ (начальная), °С;

$m = \frac{\alpha_k F_k n}{c_1 \rho_1 V}$ – темп охлаждения, с^{-1} ; α_k – коэффициент теплоотдачи от стенки канала в период отдачи тепла (охлаждения), $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$; F_k – площадь поверхности воздушного канала, м^2 ; n – количество каналов на участке полуширины теплоаккумулирующего элемента (см. рис. 4); c_1 – теплоемкость аккумулирующего материала, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{°С})$; ρ_1 – плотность аккумулирующего материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; V – объем теплоаккумулирующего элемента, м^3 ; λ_1 – теплопроводность аккумулирующего материала, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°С})$; δ – полуширина теплоаккумулирующего элемента, м; τ_0 и τ_n – соответственно

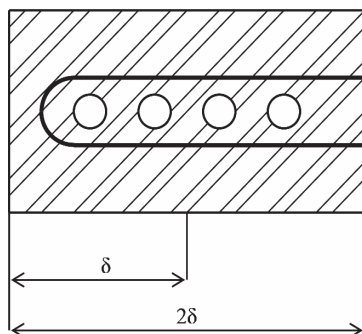


Рис. 4 – Схема теплоаккумулирующего элемента для расчета температуры $T_{\text{СК}}$ в течение периода заряда и отдачи тепла по формулам (1) и (2): δ – полуширина теплоаккумулирующего материала, м; 2δ – полная ширина, м

продолжительность охлаждения и нагрева, с;

$$q_{\text{ТЭН}} = \frac{I^2 R}{S_{\text{ТЭН}}} - \text{тепловой поток с поверхности ТЭН, Вт}/\text{м}^2;$$

I – сила тока, проходящая через ТЭН, А; R – сопротивление ТЭН, Ом; $S_{\text{ТЭН}}$ – площадь поверхности ТЭН, м^2 ; $(0,92 - 0,94)$ – коэффициент, учитывающий долю тепловой энергии от общего её количества накопленной за период заряда (нагрева), которая приходится на тепловые потери.

Оценка эффективности применения аккумулирующего материала магнезита представлена в [6]. Были получены тепловые параметры теплоаккумулирующего элемента в режиме заряда и отдачи тепла для 3-х вариантов

аккумулюючого матеріала. Аккумулюючу здатність матеріала b , Вт·с^{0,5}/(м²·°С) можна вирахувати по формулі [7]

$$b = \sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1} . \quad (3)$$

Результати розрахункових досліджень і висновки: 1) Отримані теплові параметри теплоаккумулюючого елемента запропонованої конструкції для вибраного діапазону швидкостей руху повітря по каналах. 2) Проведено порівняння отриманих результатів з аналогічними параметрами для теплоаккумулюючого елемента стандартної конструкції і зроблено висновок про теплову і економічну ефективність вибраної схеми елемента ЕТА. 3) На основі аналізу динаміки нагріву і остигання теплоаккумулюючого елемента запропоновано математичні залежності, що описують температурний режим при нагріву і остиганні. 4) Оцінено ефективність накопичення тепла.

Список літератури: 1. *Хименко, А. В.* Исследование режимов работы электрического теплового аккумулятора [Текст] / А. В. Хименко, В. А. Тарасова // *Інтегровані технології та енергозбереження*. – 2013. – № 2. – С. 136–139. – ISSN 2078-5364. 2. Выбор рациональных геометрических параметров элемента электрического теплового аккумулятора [Текст] / 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. 3. СанПин 3077-84. Санитарные нормы допустимого шума в помещениях жилых и общественных зданий и на территории жилой застройки. – Введ. 03.08.1984. – М.: Министерство здравоохранения СССР. Главное санитарно-эпидемиологическое управление, 1984. – 7 с. 4. СНиП 2.04.05-91*У Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха [Текст]. – Введ. 21.01.1994; переиздан 27.06.1996 с изм. № 1 и 20.12.2000 с изм. № 2. – М.: ГП ЦПП Минстрой России, 1994. – 66 с. 5. *Михеев, М. А.* Основы теплопередачи [Текст] / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – 2-е изд. перераб. – М.: Энергия, 1977. – 344 с. 6. *Хименко, А. В.* Эффективность применения теплоаккумулирующих материалов в электрических тепловых аккумуляторах [Текст] / А. В. Хименко // *Стратегия качества в промышленности и образовании: тез. докл. IX Международной научно-практической конференции, Болгария, 31 мая – 7 июня*. – Варна, 2013. – С. 219–223. 7. *Промышленные печи* [Текст]: справ. руководство для расчетов и проектирования / Е.И. Казанцев. – 2-е изд. доп. и перераб. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.

Bibliography (transliterated): 1. Himenko, A. V., and V. A. Tarasova. "Issledovanie rezhimov raboty jelektricheskogo teplovogo akumuljatora." *Integrovani tehnologii ta energozberezhenija* 2 (2013): 136–139. ISSN 2078-5364. Print. 2. Tarasova, V. A., and A. V. Himenko. "Vybor racional'nyh geometricheskikh parametrov jelementa jelektricheskogo teplovogo akumuljatora." *Visnyk NTU "HPI". Serija: Energetychni ta teplotehnicni procesy j ustatkuvannja*. No. 13 (987). Kharkiv: NTU "HPI", 2013. 110–115. ISSN 2078-774X. Print. 3. *SanPin 3077-84. Sanitarnye normy dopustimogo shuma v pomeshhenijah zhilyh i obshhestvennyh zdaniy i na territorii zhiloy zastrojki*. Moscow: Ministerstvo zdruvoohranenija SSSR. Glavnoe sanitarno-epidemiologicheskoe upravlenie, 1984. Print. 4. *SNiP 2.04.05-91*U. Otoplenie, ventiljacija i kondicionirovanie vozduha*. Moscow: GP CPP Minstroj Rossii, 1994. Print. 5. *Miheev, M. A., and I. M. Miheeva. Osnovy teploperedachi*. Moscow: Jenergija, 1977. Print. 6. Himenko, A. V. "Jeffektivnost' primenenija teploakkumulirujushchih materialov v jelektricheskix teplovyh akumuljatorah." *Strategija kachestva v promyshlennosti i obrazovanii: tez. dokl. IX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii* Bulgaria. 31 May – 7 June. – Varna, 2013: 219–223. Print. 7. *Kazancev, E. I. Promyshlennnye pechi: sprav. rukovodstvo dlja raschetov i proektirovanija*. Moscow: Metallurgija, 1975. Print.

Поступила (received) 17.02.2014