

УДК 66.042.88:536.244

**В.А. ТАРАСОВА**, канд. техн. наук; н.с. ИПМаш НАН України, Харків;  
**А.В. ХИМЕНКО**, аспірант ИПМаш НАН України, Харків

## **ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕПЛООВОГО АККУМУЛЯТОРА**

Выполнено расчетное исследование нестационарного теплового режима теплоаккумулирующего элемента электрического теплового аккумулятора (ЭТА). Проведена оценка влияния геометрических параметров воздушного канала на распределение температуры в теплоаккумулирующем элементе в режиме заряда и отдачи тепла. Выбраны рациональные геометрические параметры элемента ЭТА.

**Ключевые слова:** электрический тепловой аккумулятор, электроотопление, теплоаккумулирующий материал.

### **Введение**

На сегодняшний день актуальной задачей для энергетики Украины является повышение энергетической эффективности существующих систем теплоснабжения в связи с постоянным ростом цены на природный газ. Одним из эффективных путей решения данной задачи является переход на электроотопление с использованием электрических тепловых аккумуляторов (ЭТА). Аккумуляция теплоты происходит в период минимальной нагрузки энергосистемы – ночное время, когда действуют понижающие тарифные коэффициенты на стоимость потребляемой электроэнергии. Это позволяет избежать резкого снижения нагрузки энергосистемы в ночное время суток. Применение ЭТА в качестве системы отопления позволит уменьшить потери электроэнергии в электросетях в ночное время суток, что избавит от необходимости эксплуатировать электрогенераторы в режимах, отличных от номинальных, приводящих к снижению их КПД и перерасходу топлива. Таким образом, при широком внедрении ЭТА смогут выполнять функцию потребителей-регуляторов нагрузки энергосистемы [1]. Для этого необходима оценка эффективности таких систем отопления, основанная на расчете параметров тепловых процессов, протекающих в ЭТА. Решение данной задачи может быть реализовано путем проведения натуральных экспериментов или же численными методами.

### **1 Постановка задачи исследования**

В работе [2] проведено расчетное исследование нестационарного теплового режима промышленного аккумулятора тепла канального типа, работающего на уходящих дымовых газах. В [3] представлена аналитическая модель для расчета и оптимизации тепловых аккумуляторов того же типа. В качестве параметров оптимизации принимались: полутолщина слоя теплоаккумулирующего материала (ТАМ) между воздушными каналами; полувисота воздушного канала; длина. Еще одна аналитическая модель расчета теплоаккумулятора (ТА) получена в работе [4]. Авторами рассматривалась геометрия аккумулялирующего элемента в форме призмы, сферы и цилиндра. Установлено, что для повышения эффективности ТА необходимо стремиться к уменьшению площади его сечения при соответствующем увеличении его высоты.

Следует отметить, что существующие математические модели ТА не могут быть применены для расчета и оптимизации современных компактных ЭТА ввиду существенного отличия конструктивных параметров и режимов их работы.

Целью данной работы является разработка математической модели нестационарных теплообменных процессов, протекающих в теплоаккумулирующем элементе ЭТА, и поиск рациональных геометрических параметров воздушного канала ЭТА по результатам ее численной реализации.

## 2 Математическое моделирование нестационарных теплообменных процессов в теплоаккумулирующем элементе ЭТА

ЭТА работает в 2 режимах: режим заряда (нагрев) и отдачи тепла. В режиме заряда происходит нагрев теплоаккумулирующих элементов с помощью встроенных трубчатых электронагревателей (ТЭН). Подробное описание принципа работы ЭТА изложено в [1].

Схема стандартного теплоаккумулирующего элемента с заданными ГУ и принцип работы ЭТА представлена на рис. 1: теплоаккумулирующий элемент из магнетита квадратного сечения размером 0,2×0,2 м, в центре которого расположены два параллельных воздушных канала прямоугольного поперечного сечения размером 0,1×0,015 м. Длина каждого воздушного канала – 0,6 м. Таким образом, общая длина канала, по которому проходит воздушный поток, составляет 1,2 м. Боковые поверхности теплоаккумулирующего элемента покрыты тепловой изоляцией, толщина которой составляет 0,05 м. Материал тепловой изоляции – глиноземное волокно, соединенное с оксидом алюминия.

Температурное поле в теле теплоаккумулирующего элемента не постоянно и меняется во времени в течение периода заряда и отдачи тепла  $T = f(\tau)$ . Проводим расчет нестационарного температурного поля теплоаккумулирующего элемента путем решения двумерной прямой нестационарной задачи теплопроводности методом конечных элементов.

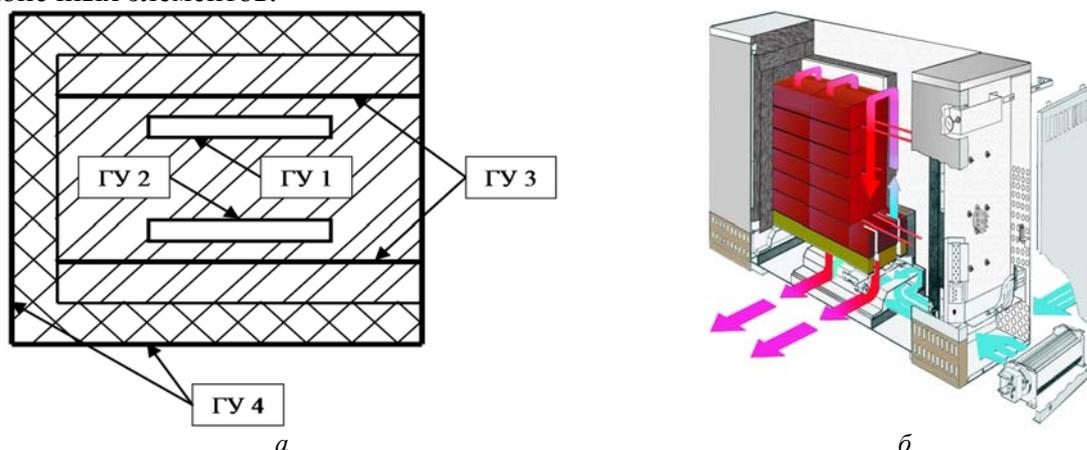


Рис. 1 – Схема стандартного теплоаккумулирующего элемента с заданными ГУ (а) и принцип работы ЭТА (б)

При формировании модели тепловых процессов в элементе ЭТА принимались следующие условия: 1) Теплофизические характеристики ТАМ, тепловой изоляции и материала ТЭН приняты постоянными. 2) Начальное распределение температуры в теле теплоаккумулирующего элемента является однородным. 3) Скорость движения воздуха принята постоянной по всей длине воздушного канала ( $\omega = 3$  м/с). 4) Поток воздуха равномерно заполняет весь объем канала. Расчет проводится для временного промежутка  $\tau = 48$  часов. Шаг счета  $\Delta\tau = 1$  час. Шаг счета  $\Delta\tau$  выбран в соответствии с условием, приведенным в [5].

Двухмерное уравнение теплопроводности для стенки канала теплоаккумулирующего элемента:

$$\frac{\partial T_{\text{СК}}}{\partial \tau} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 T_{\text{СК}}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{\text{СК}}}{\partial y^2} \right),$$

где  $T_{\text{СК}}$  – температуры стенки воздушного канала;  $a$  – температуропроводность.

Одним из важных вопросов при расчете температурного поля в элементе ЭТА является вопрос корректного задания граничных условий, которые соответствовали бы реальному физическому процессу.

Задано начальное распределение температуры (НУ) в стенке воздушного канала теплоаккумулирующего элемента  $T_{\tau=0} = 100$  °С.

Граничные условия (ГУ) выбраны с учетом работы ЭТА в режимах заряда и отдачи тепла:

– на границе Г1:  $\alpha_1(T_{\text{СК1}} - T_{\text{ж1}}) = -\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x}$ ;  $\alpha_1 = f(\tau)$ ;  $T_{\text{ж1}} = f(\tau)$ ;

– на Г2:  $\alpha_2(T_{\text{СК2}} - T_{\text{ж1}}) = -\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x}$ ;  $\alpha_2 = f(\tau)$ ;  $T_{\text{ж1}} = f(\tau)$ ;

– на Г3:  $-\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x} = q$ ;  $q = \text{const}$ ;

– на Г4:  $-\lambda_3 \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_3(T_{\text{С1}} - T_{\text{ж}})$ ;  $\alpha_3 = f(\tau)$ ;  $T_{\text{ж}} = \text{const}$ ,

где  $T_{\text{СК1}}$ ,  $T_{\text{СК2}}$  – температуры стенки 1 и 2 воздушного канала соответственно, °С;  $T_{\text{ж}}$  – температура окружающей среды, °С;  $T_{\text{ж1}}$  – температура нагреваемого воздуха, °С;  $T_{\text{С1}}$  – температура наружной поверхности теплоизоляции ЭТА, °С;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  – коэффициент теплоотдачи от стенки воздушного канала 1 и 2 к потоку нагреваемого воздуха и от наружной поверхности тепловой изоляции к потоку окружающего воздуха, соответственно, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $q$  – плотность теплового потока от стенки ТЭН, Вт/м<sup>2</sup>;  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  – коэффициент теплопроводности магнезита, стальной оболочки ТЭН, тепловой изоляции, соответственно, Вт/(м·°С).

Моделирование режимов заряда ЭТА и отдачи теплоты потоку воздуха осуществлялось путем попеременного задания граничных условий на Г3 и Г2, Г1 (рис. 2).

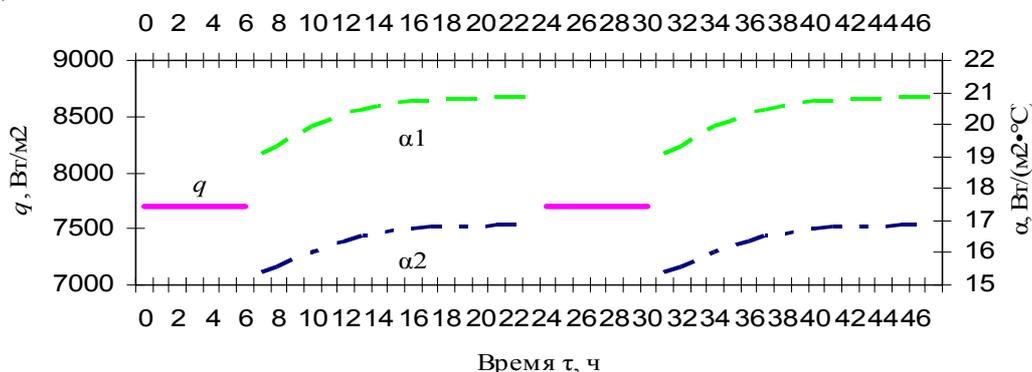


Рис. 2 – Задание ГУ на Г3, Г2 и Г1 во времени  $\tau$

ГУ подбирались согласно результатам экспериментальных данных таким образом, чтобы обеспечить нагрев теплоаккумулирующего элемента в режиме заряда до температуры 650 °С [6], т.к. предельно допустимая температура нагрева наружной

оболочки ТЭН не более  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  [7], а в конце периода отдачи тепла получить температуры стенки воздушного канала  $T_{\text{СК}}$  не менее  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  [8].

Следует отметить, что по высоте воздушного канала условия теплообмена изменяются, что делает задачу теплового взаимодействия потока воздуха и стенок канала трехмерной. Очевидно, что трехмерная задача может быть сведена к серии двумерных задач в горизонтальных сечениях ЭТА, если задавать температуру воздуха в каждом из сечений с учетом его нагрева в предшествующих участках канала. Были рассмотрены три сечения ЭТА, расположенные через каждые  $0,15\text{ м}$  по высоте канала. Проведенные расчеты показали, что разница между полученным распределением температур в теплоаккумулирующем элементе в рассматриваемых сечениях составила не более  $(3\text{--}5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Поэтому принято решение рассматривать двухмерную модель теплоаккумулирующего элемента.

### 3 Выбор рациональных геометрических параметров элемента ЭТА

Для оценки влияния геометрических параметров воздушного канала на распределение температуры проведен расчет нестационарного температурного поля для теплоаккумулирующего элемента заданных размеров, но с изменением геометрической формы и размеров воздушного канала. ГУ задаются таким же образом, как и в варианте рассмотренном выше. Предложены три варианта геометрических параметров воздушного канала (см. рис. 3з): 1) Один канал прямоугольного сечения размером  $0,1 \times 0,03\text{ м}$ . 2) Два канала круглого сечения  $d = 0,044\text{ м}$ . 3) Три канала круглого сечения  $d = 0,035\text{ м}$ . Площадь сечения каналов подбиралась при условии, чтобы суммарное ее значение было эквивалентно площади поперечного сечения двух воздушных каналов стандартного теплоаккумулирующего элемента. Средняя скорость потока также принимается как в исходном варианте. Равенство геометрических параметров исследуемых теплоаккумулирующих элементов обеспечивает корректность оценки влияния изменения формы и размеров воздушного канала на распределение температуры в теплоаккумулирующем элементе. Схема движения воздуха принята следующая: воздушные потоки по каналам движутся параллельно в направлении снизу вверх. Высота воздушного канала уменьшена по сравнению с исходной моделью и принята равной  $0,5\text{ м}$ . Кроме того, было смоделировано новое расположение встроенных ТЭН, которые были смещены в центральную часть элемента ЭТА.

Анализируя полученные результаты расчетного исследования (см. рис. 3) можно сделать вывод, что наиболее эффективным из рассмотренных вариантов является схема теплоаккумулирующего элемента с двумя каналами круглого сечения. При такой схеме в период отдачи тепла значение температур нагреваемого воздуха на выходе из канала не превышают максимально допустимых [6] (см. рис. 3а). Получена максимальная теплоотдача от стенки канала к потоку нагреваемого воздуха (см. рис. 3б) и достаточно высокая температура стенки воздушного канала в конце периода аккумуляирования тепла (более  $830\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (см. рис. 3в). Последний параметр свидетельствует о превышении максимального значения температуры нагрева теплоаккумулирующего элемента в период аккумуляирования тепла. Это дает возможность снизить тепловой поток  $q$  благодаря уменьшению электрической мощности ТЭН, что позволит сократить общее энергопотребление ЭТА. Подбор и расчет технических характеристик и электрических параметров ТЭН осуществляется по [7]. Также можно сделать вывод о малоэффективности стандартной схемы теплоаккумулирующего элемента с последовательным прохождением воздушного потока по двум каналам прямоугольного сечения.

Эффективность схемы на рис. 4б обусловлена более низким темпом охлаждения

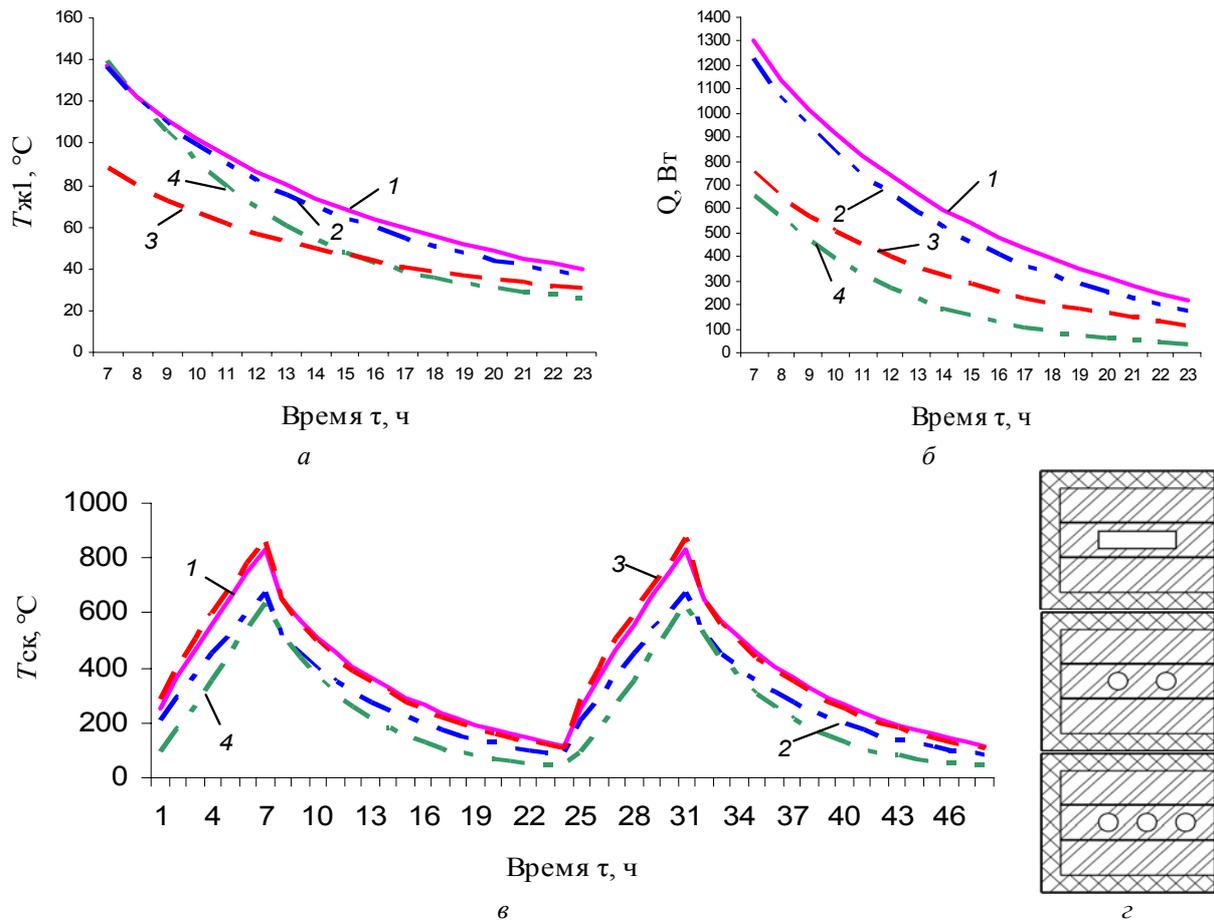


Рис. 3 – Тепловые параметры нагреваемого воздуха на выходе из канала (а, б), изменение температуры стенки воздушного канала в период заряда и отдачи тепла (в) и схемы теплоаккумулирующих элементов (z): 1 – схема теплоаккумулирующего элемента с двумя воздушными каналами круглого сечения; 2 – то же с тремя каналами; 3 – то же с одним каналом прямоугольного сечения; 4 – то же с двумя каналами прямоугольного сечения (стандартная конструкция)

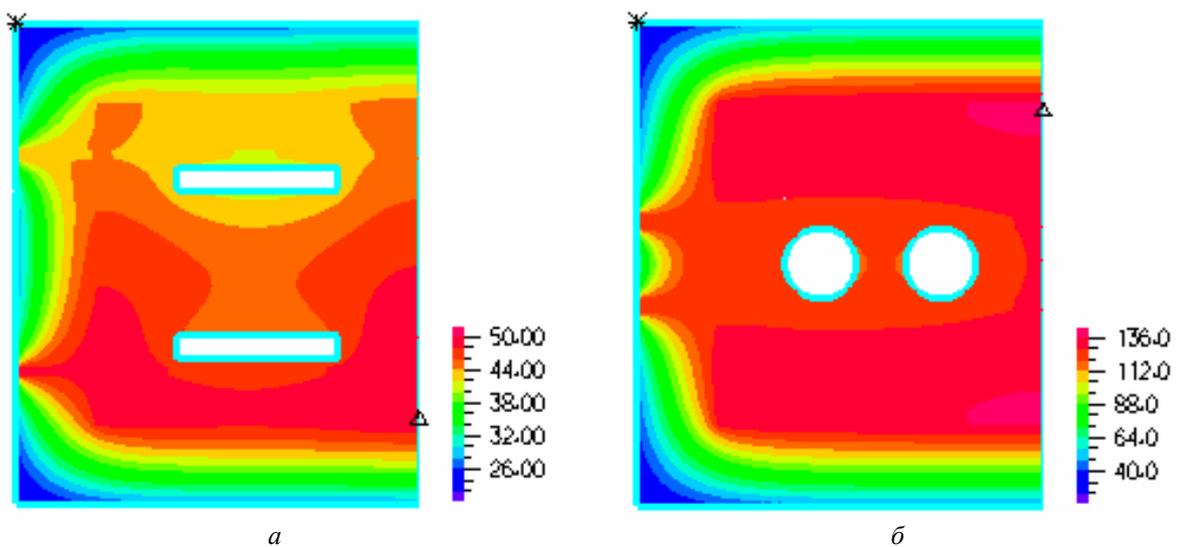


Рис. 4 – Конечное распределение температуры в теплоаккумулирующем элементе в конце периода отдачи тепла: а – схема теплоаккумулирующего элемента с двумя каналами прямоугольного сечения (стандартная конструкция); б – то же с двумя каналами круглого сечения

и равномерным распределением температуры в теплоаккумулирующем элементе в режиме отдачи тепла. Полученное значение конечной температуры в стенке воздушного канала теплоаккумулирующего элемента в варианте со схемой на рис. 4б в 2,7 раза выше, чем значение аналогичного параметра в случае со схемой на рис. 4а.

**Результаты расчетных исследований и выводы:** 1 Выбрана энергоэффективная схема теплоаккумулирующего элемента с двумя каналами круглого сечения, при которой обеспечивается максимальная теплоотдача от стенки канала к потоку нагреваемого воздуха. 2 Расположение ТЭН и воздушных каналов в центральной части теплоаккумулирующего элемента более рационально. В этом случае вблизи воздушных каналов сосредоточена область с максимальными значениями температуры теплоаккумулирующего элемента. При перемещении ТЭН к боковым поверхностям элемента наблюдается резкое повышение температуры наружной поверхности тепловой изоляции, и как следствие этого большие теплотери. 3 Предложенная схема теплоаккумулирующего элемента позволяет уменьшить потребление электроэнергии ЭТА.

Перспективой дальнейших исследований является выбор рациональных режимов работы и совершенствование конструктивных параметров ЭТА.

**Список литературы:** 1. *Мацевитый, Ю.М.* Оценка энергетической эффективности систем электротеплоаккумуляционного отопления административных зданий [Текст] / Ю.М. Мацевитый, Н.Г. Ганжа, А.В. Хименко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2011. – № 10. – С. 9-16. – ISSN 2218-1849. 2. *Шмидт.* Переходные процессы в тепловом аккумуляторе с твердым наполнителем [Текст] / Шмидт, Сцега // Теплопередача. – 1976. – № 3. – С. 141-148. 3. *Левенберг, В.Д.* Аккумуляирование тепла [Текст] / В.Д. Левенберг, М.Р. Ткач, В.А. Гольстрем – К.: Техника, 1991. – 112 с. 4. *Высоцкий, Л.И.* Электроотопители аккумулярующего типа [Текст] / Л.И. Высоцкий. – М.: Информэлектро, 1971. – 17 с. 5. *Теплотехника* [Текст] / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт [и др.]; под ред. А.П. Баскакова. – 2-е изд. перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 224 с. 6. *Симонов, А.А.* Бытовое электрическое отопление с аккумулярованием тепла – важнейший фактор эффективного использования электроэнергии [Текст] / А.А. Симонов // Энергетика и электрификация. – 1992. – № 1. – С. 26-30. 7. ГОСТ 19108-81. Электронагреватели трубчатые (ТЭН) для бытовых нагревательных приборов [Текст]. – Взамен ГОСТ 19108-79; введ. 14.08.1981; переиздан (08.1990) с Изм. № 1,2 от 06.1987 и 05.1990. – М.: Государственный комитет по стандартам СССР, 1990. – 21 с. 8. *Тепловые накопители* [Электронный ресурс]: US ENERGY. – Режим доступа: <http://us-energy.com.ua/index.php/12-dinamicheskie-teplovye-nakopiteli-elnur.html>. – Название с экрана.

Поступила в редколлегию 01.03.13

УДК 66.042.88:536.244

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

Виконано розрахункове дослідження нестационарного теплового режиму теплоаккумуляуючого елемента електричного теплового акумулятора (ЕТА). Проведено оцінку впливу геометричних параметрів повітряного каналу на розподіл температури в теплоаккумуляуючому елементі в режимі заряду і віддачі тепла. Обрані раціональні геометричні параметри елемента ЕТА.

**Ключові слова:** електричний тепловий акумулятор, електроопалення, теплоаккумуляуючий матеріал.

Completed calculated study of unsteady thermal conditions thermal storage element of the electric thermal storage (ETS). Evaluated of the impact of geometrical parameters of the air channel on the temperature distribution in the thermal storage element in the charge and heat loss. Selected rational geometric parameters of element ETS.

**Keywords:** electric thermal storage, electric heating, heat storage material.