

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕПЛООВОГО АККУМУЛЯТОРА

Введение. Электроотопление является одним из альтернативных вариантов газовому отоплению. Согласно [1] использование электроэнергии для отопления допускается при соблюдении следующих условий. Прежде всего, необходимо сократить удельные теплотери здания, повысить значения термического сопротивления ограждающих конструкций здания до нормативных значений путем термомодернизации и применения тепловых утилизаторов в системах вентиляции здания. Вторым условием использования электроэнергии для отопления является применение теплоаккумуляционных систем, потребляющих электроэнергию в ночное время суток. Применение ЭТА в качестве систем отопления является экономически целесообразным для потребителей, т.к. в ночное время действуют понижающие тарифные коэффициенты на потребление электроэнергии. Широкое внедрение теплоаккумуляционных систем позволит избежать резкого перепада нагрузки энергосистемы в ночное время и перевода электрогенерирующих мощностей в режимы, отличные от номинальных, как следствие – уменьшение потерь электроэнергии в электросетях при ее транспортировке и снижении потребления органического топлива на ТЭС.

Анализируя литературные источники по теме исследования [2, 3, 4, 5] можно сделать вывод о том, что недостаточно внимания уделено повышению эффективности и выбору рациональных режимов работы ЭТА. Также необходимо отметить тот факт, что существующие математические модели тепловых аккумуляторов не могут быть применены для расчета и оптимизации современных компактных ЭТА ввиду существенного отличия схемных решений и принципов их работы.

Целью данной работы является расчет нестационарного температурного поля теплоаккумулирующего элемента ЭТА при условии изменения скорости прохождения воздушного потока по каналу теплоаккумулирующего элемента, а также выбор рациональных режимов работы ЭТА на основе выполненных расчетов.

ЭТА работает в 2 режимах: режим заряда (нагрев) и отдачи тепла. В режиме заряда происходит нагрев теплоаккумулирующих элементов с помощью встроенных трубчатых электронагревателей (ТЭН). Схема и подробное описание принципа работы ЭТА представлены в [6].

Схема движения воздушного потока по каналам теплоаккумулирующего элемента и его горизонтальное сечение с заданными ГУ представлены на рис. 1: теплоаккумулирующий элемент квадратного сечения размером 0,2×0,2 м, выполненный из магнезита, 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.

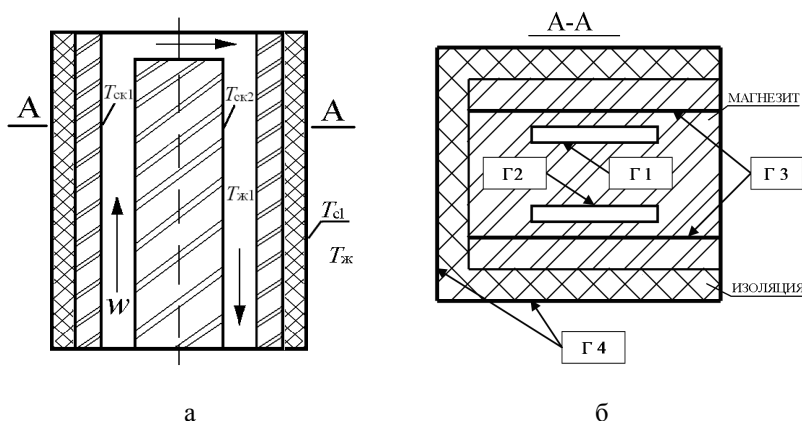


Рисунок 1 – Схема стандартного теплоаккумулирующего элемента с заданными ГУ:

а – схема движения воздушного потока по каналам теплоаккумулирующего элемента; б – горизонтальное сечение теплоаккумулирующего элемента с заданными ГУ

Расчет нестационарного температурного поля теплоаккумулирующего элемента проводился путем решения двухмерной прямой нестационарной задачи теплопроводности методом конечных элементов. Следует отметить, что по высоте воздушного канала условия теплообмена изменяются, что делает задачу теплового взаимодействия потока воздуха и стенок канала трехмерной. Данную трехмерную задачу можно свести к серии двумерных задач, рассматривая горизонтальные сечения воздушного канала и задавая температуру воздуха в каждом из сечений с учетом его нагрева в предшествующих участках канала.

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. Расчет проводится для временного промежутка $\tau = 120$ часов. Шаг счета $\Delta\tau = 1$ час. Шаг счета $\Delta\tau$ выбран в соответствии с условием, приведенным в [7].

Начальное распределение температуры в стенке воздушного канала теплоаккумулирующего элемента было принято $T_{\tau=0} = 100$ °С.

Граничные условия (ГУ) выбраны с учетом работы ЭТА в режимах заряда и отдачи тепла (рис. 1):

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

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

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

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

Смоделируем режим работы электротеплоаккумуляционной системы отопления для помещения административного здания. Необходимо обеспечить температуру воздуха в помещении 20 °С. Окна ориентированы на запад. Максимальные значения теплоступлений от солнечной радиации наблюдается в период с 13.00 до 15.00. Выбран временной интервал 5 суток: 2 рабочих дня, 2 выходных дня, 1 рабочий день после выходных.

Для выбора рационального режима работы ЭТА рассмотрим 2 варианта: 1. В течение первых двух суток и суток после выходных задавался следующий режим работы ЭТА: с 07.00 до 13.00 скорость движения воздуха в канале – $\omega = 3$ м/с; с 13.00 до 15.00 – отключение вентилятора ЭТА; с 15.00 до 18.00 – $\omega = 2,5$ м/с; с 18.00 до 24.00 – $\omega = 2$ м/с; с 24.00 до 07.00 – режим заряда ЭТА. В течение 2 выходных дней теплоотдача от стенки воздушного канала теплоаккумулирующего элемента к потоку нагреваемого воздуха происходит при постоянной скорости $\omega = 2$ м/с. Режим заряда ЭТА – с 24.00 до 07.00; 2) Для первых двух суток и суток после выходных режим работы ЭТА остается неизменным. В субботу: режим заряда ЭТА – с 24.00 до 07.00. Режим отдачи тепла путем вынужденной конвекции не осуществляется (вентилятор отключен). Нагрев помещения в течение дня осуществляется за счет остывания наружной поверхности ЭТА путем естественной конвекции. Режим заряда ЭТА – с 04.00 до 07.00. В воскресенье: в течение всего дня теплоотдача от стенки воздушного канала теплоаккумулирующего элемента к потоку нагреваемого воздуха происходит при постоянной скорости $\omega = 3$ м/с. Режим заряда ЭТА – с 24.00 до 07.00.

ГУ подбирались таким образом, чтобы обеспечить нагрев теплоаккумулирующего элемента в режиме заряда до температуры 650 °С [2], т.к. предельно допустимая температура нагрева наружной оболочки ТЭН не более 700 °С [8], а в конце периода отдачи тепла получить температуры стенки воздушного канала $T_{СК}$ не менее 50 °С [9].

На рис. 2 показано изменение коэффициентов теплоотдачи от стенок каналов к потоку нагреваемого воздуха для первого α_1 и второго канала α_2 (режим отдачи тепла), а также задание ГУ II рода во времени (режим заряда). Значения α и q , представленные на рис. 2, моделируют режим работы ЭТА в рабочий и выходной день.

Полученное распределение температуры в стенке воздушного канала $T_{СК}$ теплоаккумулирующего элемента ЭТА при двух режимах работы представлено на рис. 3.

Следует отметить, что при отключении вентилятора ЭТА в период с 13.00 до 15.00 наблюдается повышение $T_{СК}$ на 13–15 °С за счет тепловой инерции аккумулирующего материала (рис. 3 а,б). В субботу в

течение дня при отключенном вентиляторе ЭТА происходит остывание теплоаккумулирующих элементов в среднем на 200 °С (рис. 3б).

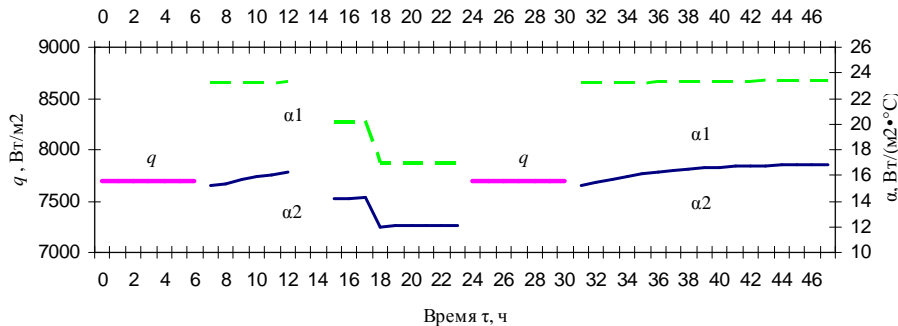
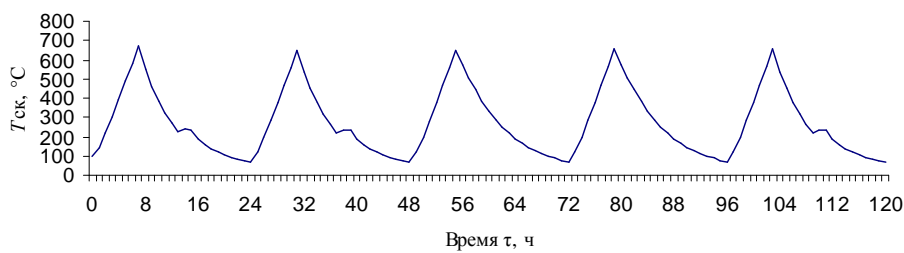
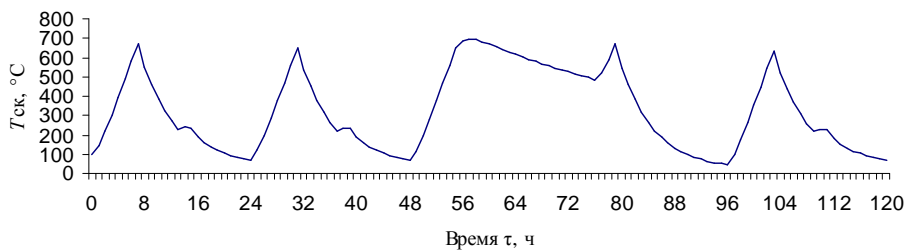


Рисунок 2 – Задание ГУ на ГЗ, Г2 и Г1 во времени τ



а



б

Рисунок 3 – Распределение температуры $T_{СК}$ в стенке воздушного канала теплоаккумулирующего элемента в течение $\tau = 120$ часов: а – режим 1; б – режим 2

Таким образом, по результатам проведенных расчетных исследований можно сделать вывод о том, что режим работы 2 ЭТА (рис. 3б) является более рациональным.

Для оценки экономической эффективности работы ЭТА проведено сравнение с электрическим нагревательным прибором конвективного типа. Рассмотрим 3 ЭТА и 3 электрических конвектора одинаковой электрической мощностью по 2 кВт каждый, работающие в течение 5 суток. При расчете учитывался трехзонный тариф для непромышленных потребителей II класс напряжения (менее 35 кВ). Стоимость электроэнергии для данного класса потребителей – 0,9924 грн. [10]. Сравнительная характеристика рассматриваемых электрических отопительных приборов приведена в табл. 1.

Таблица 1 – Количество потребляемой электроэнергии и ее стоимость для ЭТА и электрического нагревательного прибора конвективного типа (конвектор)

№ п/п	Тип отопительного прибора	Е, кВт·ч	S, грн.
1	ЭТА(режим 1)	210	72, 94
2	ЭТА(режим 2)	186	64, 61
3	Электрический конвек-	510	31

	тор		6,95
--	-----	--	------

Выводы. Результаты проведенных расчетных исследований показали, что сформированная математическая модель может быть использована для выбора рациональных режимов работы ЭТА. С помощью данной модели возможен расчет температурного поля теплоаккумулирующего элемента, который позволит определить температуру воздуха на выходе из ЭТА, его тепловую мощность с учетом тепловых потерь ЭТА и влияния внешних климатических параметров.

Обозначения. $T_{СК1}$, $T_{СК2}$ – температуры стенки 1 и 2 воздушного канала соответственно, °С; $T_{ж}$ – температура окружающей среды, °С; $T_{ж1}$ – температура нагреваемого воздуха, °С; $T_{С1}$ – температура наружной поверхности теплоизоляции ЭТА, °С; α_1 , α_2 , α_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/(м²·°С); q – плотность теплового потока от стенки ТЭН, Вт/м²; λ_1 , λ_2 , λ_3 – коэффициент теплопроводности магнезита, стальной оболочки ТЭН, тепловой изоляции, соответственно, Вт/(м·°С); E – кол-во потребляемой электроэнергии в течение суток, кВт; S – стоимость потребленной электроэнергии, грн.

Литература

1. 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 Минстормой России, 1994. – 66 с.
2. 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.
3. Левенберг, В.Д. Аккумулярование тепла [Текст] / В.Д. Левенберг, М.Р. Ткач, В.А. Гольстрем – К.: Техника, 1991. – 112 с.
4. Шмидт. Переходные процессы в тепловом аккумуляторе с твердым наполнителем [Текст] / Шмидт, Сцега // Теплопередача. – 1976. – № 3. – С. 141–148.
5. Высоккий, Л.И. Электроотопители аккумулярующего типа [Текст] / Л.И. Высоккий. – М.: Информэлектрон, 1971. – 17 с.
6. Мацевитый, Ю.М. Оценка энергетической эффективности систем электротеплоаккумуляционного отопления административных зданий [Текст] / Ю.М. Мацевитый, Н.Г. Ганжа, А.В. Хименко // Энерго-сбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2011. – № 10. – С. 9–16.
7. 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.
8. 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.
9. Тепловые накопители [Электронный ресурс]: US ENERGY. – Режим доступа: <http://us-energy.com.ua/index.php/12-dinamicheskie-teplovye-nakopiteli-elnur.html>. – Название с экрана.
10. Розміри діючих тарифів на електроенергію на березень 2013 року [Электронный ресурс]: официальный сайт акционерной компании ХАРЬКОВОБЛЭНЕРГО. – Режим доступа: <http://www.oblenergo.kharkov.ua/tarif.html>. – Название с экрана.

Bibliography (transliterated)

1. SNiP 2.04.05-91*U Otoplenie, ventiljacija i kondicionirovanie vozduha [Tekst]. – Vved. 21.01.1994; pe-reizdan 27.06.1996 s Izm. # 1 i 20.12.2000 s Izm. #2. – M.: GP CPP Minstorj Rossii, 1994. – 66 p.
2. Simonov, A.A. Bytovoe jelektricheskoe otoplenie s akumulirovaniem tepla – vazhnejshij faktor jeffektivnogo ispol'zovanija jelektroenergii [Tekst] A.A. Simonov Jenergetika i jelektrifikacija. – 1992. – # 1. – p. 26–30.
3. Levenberg, V.D. Akkulirovanie tepla [Tekst] V.D. Levenberg, M.R. Tkach, V.A. Gol'strem – K.: Teh-nika, 1991. – 112 p.
4. Shmidt. Perehodnye processy v teplovom akumuljatore s tverdym napolnitelem [Tekst] Shmidt, Scego Teploperedacha. – 1976. – # 3. – p. 141–148.
5. Vysockij, L.I. Jelektrotopiteli akumulirujushhego tipa [Tekst] L.I. Vysockij. – M.: Infor-mjelektro, 1971. – 17 p.

6. Macevityj, Ju.M. Ocenka jenergeticheskoy jeffektivnosti sistem jelektroteploakkumuljacionnogo otoplenija administrativnyh zdaniy [Tekst] Ju.M. Macevityj, N.G. Ganzha, A.V. Himenko Jenergo-sberezhenie. Jenergetika. Jenergoaudit. – 2011. – # 10. – p. 9–16.
7. Teplotehnika [Tekst] A.P. Baskakov, B.V. Berg, O.K. Vitt [i dr.]; pod. red. A.P. Baskakova. – 2-e izd. pererab. – M.: Jenergoatomizdat, 1991. – 224 p.
8. GOST 19108-81. Jelektronagrevateli trubchatye (TJeN) dlja bytovyh nagrevatel'nyh priborov [Tekst]. – Vzamen GOST 19108-79; vved. 14.08.1981; pereizdan (08.1990) s Izm. # 1,2 ot 06.1987 i 05.1990. – M.: Gosudarstvennyj komitet po standartam SSSR, 1990. – 21 p.
9. Teplovyje nakopiteli [Jelektronnyj resurs]: US ENERGY. – Rezhim dostupa: <http://us-energy.com.ua/index.php/12-dinamicheskie-teplovye-nakopiteli-elnur.html>. – Nazvanie s jekrana.
10. Rozmiri dijuchih tarifiv na elektroenergiju na berezen' 2013 roku [Jelektronnyj resurs]: ofici-al'nyj sajt akcionernoj kompanii HAR"KOVOBLJeNERGO. – Rezhim dostupa: <http://www.oblenergo.kharkov.ua/tarif.html>. – Nazvanie s jekrana.

УДК 66.042.88:536.244

Хіменко О.В., Тарасова В.О.

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТЕПЛООВОГО АКУМУЛЯТОРА

Виконано чисельне моделювання режимів роботи електричного теплового акумулятора (ЕТА). Отримано розподіл температури в теплоакumuлюючому елементі з урахуванням регулювання швидкості руху повітряного потоку по каналу теплоакumuлюючого елемента ЕТА. Показано ефективність електротеплоакumuляційних систем опалення в порівнянні з традиційними системами електроопалення.

Khimenko A.V., Tarasova V.A.

RESEARCH OF MODES OF FUNCTIONING OF ELECTRIC THERMAL STORAGE

Numerical simulation modes of functioning electric thermal storage (ETS). Obtained the distribution of temperature in the thermal storage element with the speed control of air flow through the channel thermal storage element ETS. Showed the efficiency of electric thermal storage systems as compared to traditional electric heating systems.