

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

УДК 536.24:621.791.55

С. С. БЕЛИМЕНКО^{1*}, В. А. ИЩЕНКО^{2*}

^{1*}ООО «Теплотехника», ул. К. Маркса, 93, к. 227, Днепропетровск, Украина, 49000, тел./факс +38 (056) 33 33 06, эл. почта director@teplotehnika.dp.ua, ORCID 0000-0002-9935-4778

^{2*}Каф. «Теплотехника», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 76, эл. почта vladichsh@gmail.com, ORCID 0000-0002-5948-9483

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАРЯДА И РАЗРЯДА ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО АККУМУЛЯТОРА

Цель. В работе необходимо разработать критерии подобия для различных режимов работы твердотельного теплового аккумулятора (ТА), работающего за счет накопления тепловой энергии в объеме теплоаккумулирующего материала без фазового перехода, а также создать комплексный критерий эффективности теплового аккумулятора для определения весогабаритных показателей и режимов его работы на этапе проектирования. **Методика.** Для достижения целей исследования использованы теория подобия и анализ размерностей, а также методики планирования проведения физического эксперимента. **Результаты.** На основе теории подобия и анализа размерностей получены критерии подобия работы твердотельных тепловых аккумуляторов при заданных базисных параметрах. Это критерии эффективности заряда, разряда и полный критерий. Используются три теоремы теории подобия в приложении к решению теплотехнической задачи. Критерий эффективности заряда теплового аккумулятора характеризует эффективность достижения заданного значения удельного количества тепла в материале теплового аккумулятора при заряде, при принятых материалах, геометрических соотношениях и теплового потока подводимого тепла. Критерий эффективности разряда характеризует эффективность разряда теплового аккумулятора при принятых материалах, массе аккумулирующего тела и общего аккумулированного количества тепла при установленном значении теплового потока и времени разряда. Полный коэффициент эффективности работы ТА характеризует эффективность работы теплового аккумулятора за полный цикл. **Научная новизна.** Анализ показал, что возможна реализация любой системы твердотельного теплового аккумулятора на основе структурной схемы данного типа устройств. Получены критерии подобия эффективности заряда, эффективности разряда и полный критерий эффективности работы твердотельного теплового аккумулятора на основе твердого аккумулирующего материала без фазового перехода. **Практическая значимость.** Критерии, приведенные в данной работе, носят сравнительный характер. В соответствии с полученными критериями можно сравнивать близкие по конструкции проектируемые и существующие тепловые аккумуляторы. Техничко-экономический анализ показывает, что предложенная методология оценки эффективности работы твердотельных тепловых аккумуляторов на разных режимах работы является эффективной, технически реализуемой и позволяет определить весогабаритные показатели и режимы работы твердотельного теплового аккумулятора на этапе проектирования.

Ключевые слова: твердотельный тепловой аккумулятор; твердый аккумулирующий материал; эффективность заряда; эффективность разряда; теория подобия; анализ размерностей; критерий подобия

Введение

В настоящее время, одним из приоритетных направлений энергосбережения, является эконо-

номия затрат на теплоснабжение промышленных зданий и вокзалов, обогрев вагонов пассажирских поездов при перевозке пассажиров, те-

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

пловозов, находящихся в горячем резерве депо [6], за счет запасенной тепловой энергией в ночное время и отдаче ее в дневные часы. В результате этого экономия достигается за счет разницы тарифов на стоимость электрической энергии в дневное и ночное время, а также ведет к значительному снижению выбросов CO₂ в атмосферу, что является требованием Евросоюза и способствует активной разработке и внедрению тепловых аккумуляторов [17]. Переход на «ночной» тариф позволяет платить за электрическую энергию в среднем в три раза дешевле, в сравнении с обычным режимом работы. Одним из наиболее распространенных типов устройств, которые позволяют аккумулировать и отдавать полученное разными способами тепло, являются тепловые аккумуляторы (ТА). Теплоаккумулирующие устройства могут также использоваться для прогрева тепловозных дизелей [9], автономным методом, что позволяет значительно экономить топливо и увеличивать моторесурс дизеля, кроме того предлагается использовать тепловые аккумуляторы для регулирования пиковой нагрузки при использовании когенерационных и ветровых электростанций [16]. Наибольшее распространение теплоаккумулирующие устройства нашли в энергетике, машиностроении. По температурному интервалу ТА можно разделить на четыре группы: для производства холода – $T < 20$ °С; низкотемпературные – 20 °С $< T < 200$ °С; среднетемпературные – 200 °С $< T < 500$ °С; высокотемпературные – $T > 500$ °С. Наибольшее применение нашли низкотемпературные и высокотемпературные ТА. Использование ТА, в первую очередь, связано с системами жизнеобеспечения человека, а также экологически чистыми способами производства энергии с учетом оптимизации потребления энергии, а также с оптимизацией их весогабаритных показателей. Тепловые аккумуляторы с твердым теплоаккумулирующим материалом (ТАМ) в настоящее время занимают преобладающее положение, что связано, в первую очередь, с использованием относительно дешевых материалов в сочетании с простыми и проверенными конструктивными и технологическими решениями. ТА обладает практически неограниченным ресурсом работы. Следует отметить, что важнейшим моментом при проектировании ТА является определение весогабаритных показателей, а также оптимизация рабочих

режимов их работы. Следовательно, изучение и разработка методологии определения весогабаритных показателей и определения рабочих режимов работы ТА является важной задачей энергосбережения, актуальной в современных условиях дефицита энергоносителей.

До настоящего времени опубликовано большое количество работ по ТА и ТАМ, например работы [10, 13]. Функционирование ТА в процессе аккумулирования тепла может осуществляться за счет двух основных механизмов: первый происходит вследствие изменения физических параметров ТАМ; второй – за счет использования энергии связи атомов и молекул веществ.

Базируясь на первом законе термодинамики для незамкнутой системы с постоянным химическим составом, характеристики тепловых аккумуляторов связаны определенными функциональными зависимостями с градиентами различных физических величин, а именно: энтальпии и внутренней энергии материала, давления, массы, объема. При этом следует учитывать взаимосвязь между этими физическими величинами, а также влияние на них температурного поля.

Наиболее распространенными и простыми в применении являются аккумуляторы емкостного типа, в которых используется теплоемкость вещества, нагреваемого без изменения его агрегатного состояния. Теплоаккумуляционная способность или мощность, которую можно накопить в аккумуляторе теплоты емкостного типа, находится из формулы:

$$Q = m C_p (T_2 - T_1), \quad (1)$$

где m – масса теплоаккумулирующего вещества; C_p – удельная изобарная теплоемкость вещества (для воды $C_p = 1,16$ Вт / (кг·К); T_1 и T_2 – средние значения начальной и конечной температуры ТАМ.

Для расчетов весогабаритных характеристик ограничиваются определением массы, согласно формулы 1. При расчетах режима работы ТА рассматривают процессы теплопередачи, применяя классические подходы анализа тепловых полей [11], а также методики, основанные на подобии процессов теплопередачи в устройствах теплотехнического назначения [14]. Математические модели хранения и разряда ТА направлены на описание теплового поля ТАМ [7, 8] и не могут быть напрямую применены для

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

расчета весогабаритных характеристик ТА. Ввиду сложности классического описания процессов накопления и расхода тепла в ТА, а также имея достаточный опыт в проектировании и изготовлении ТА, воспользуемся теорией подобия и анализа размерностей.

Для определения конструктивной схемы рассмотрим типичные конструкции ТА, которые встречаются в научно-технической и патентной литературе. Например, в качестве ТАМ во многих случаях в ТА используются смеси различных компонентов и разнообразные композиционные материалы. Для аккумуляции тепловой энергии в ТА используется как теплоемкость ТАМ, так и скрытая теплота фазовых переходов. Пример такой системы ТА представлен в [12].

Широкое распространение композиционных материалов привело к их использованию и в этой области техники. Например, предложен ТА с каналами из композиционного материала [8].

Приведенные конструкции ТА полностью отражают структуру и конструкцию типичного ТА на основе твердого ТАМ. Таким образом, ТА всегда содержит теплоизолированное теплоаккумулирующее тело, нагреватель, системы охлаждения, безопасности, регулирования подвода и отвода тепла.

Цель

Цель работы – определение весогабаритных характеристик твердотельного высокотемпературного ТА и режимов его работы. Для решения этой задачи следует разработать критерии

подобия для различных режимов работы ТА, работающих за счет накопления тепловой энергии в объеме ТАМ без фазового перехода, а также создать комплексный критерий эффективности ТА для определения весогабаритных показателей ТА и режимов его работы на этапе проектирования.

Методика

В настоящей работе рассмотрены следующие разновидности ТТА

- ТА с воздушным охлаждением – АЭТ;
- ТА с водяным охлаждением – АЭТ В;
- ТА с комбинированным охлаждением – АЭТ ВВ.

Основные конструктивные особенности ТТА приведены в [2, 3].

Структурную схему ТА можно представить, как показано на рис. 1.

ТТА представляет собой совокупность нескольких систем, конструктивно объединенных в единую конструкцию. Так обязательным элементом ТА является система нагрева, в нашем случае – это трубчатые электрические нагреватели (ТЭН). Вырабатываемое ТЭН тепло накапливается в твердом аккумулялирующем теле (ТАТ) ТА – осуществляется заряд ТА. Для использования накопленного тепла ТА имеет систему охлаждения, в нашем случае это воздушные и водяные каналы. При активной циркуляции теплоносителя – воздуха и/или воды, тепло отбирается от ТАТ и подается потребителю. Система распределения тепла в состав ТА не входит.

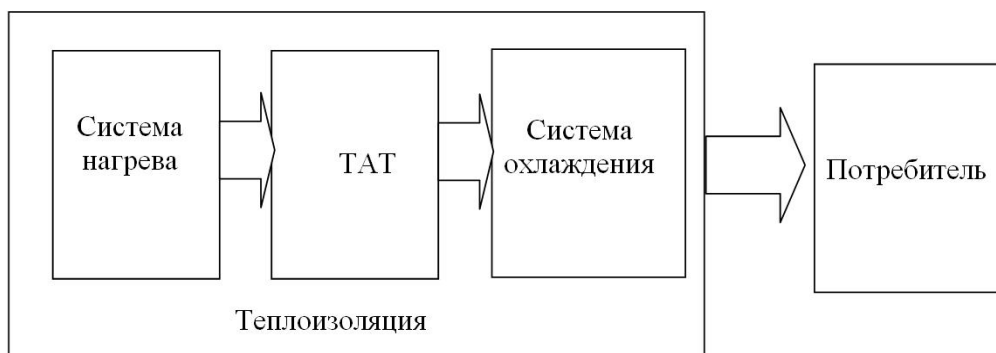


Рис. 1. Структурная схема ТА

Fig. 1. Structural diagram of TA

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

При различных сочетаниях конструкций отдельных элементов ТА можно получить различные конструкции ТА.

Исходя из того, что исследуемые объекты подобны, воспользуемся теорией подобия и анализа размерностей для получения критериев подобия для рассматриваемых выше систем [5]. Так согласно первой теореме подобия получим критерии подобия для каждого значимого параметра ТА. Перечень значимых параметров, которые влияют на процесс аккумуляции и расхода тепла представлены в табл. 1. Размерность в системе СИ – [MLTΘ], где M – масса, L – длина, T – время, Θ – температура. Преобразование производных размерностей в системе [MLTΘ], в простые соответствующие системе СИ приведены ниже.

Удельная теплоемкость:

$$\begin{aligned} [\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})] &= [\text{Н} \cdot \text{м}/(\text{кг} \cdot \text{К})] = \\ &= [(\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2)/(\text{кг} \cdot \text{К})] = [(\text{м}^2/(\text{с}^2 \cdot \text{К}))] = \\ &= [\text{L}^2 \text{T}^{-2} \Theta^{-1}]. \end{aligned}$$

Эффективная теплопроводность:

$$\begin{aligned} [\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})] &= [\text{Дж}/(\text{см} \cdot \text{К})] = [\text{Н} \cdot \text{м}/(\text{см} \cdot \text{К})] = \\ &= [(\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}^3 \cdot \text{К})] = [\text{MLT}^{-3} \Theta^{-1}]. \end{aligned}$$

Удельное количество тепла в массе:

$$\begin{aligned} [\text{Дж}/\text{кг}] &= [\text{Н} \cdot \text{м}/\text{кг}] = [(\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2) \cdot \text{кг}] = \\ &= [\text{м}^2/\text{с}^2] = [\text{L}^2 \text{T}^{-2}]. \end{aligned}$$

Тепловой поток:

$$[\text{Вт}/\text{м}^2] = [(\text{Дж}/\text{с})/\text{м}^2] = [\text{Н}/\text{см}] = [\text{кг}/\text{с}^3] = [\text{MT}^{-3}].$$

Таблица 1

Перечень значимых параметров для ТА

Table 1

The list of significant parameters for TA

№ п/п	Название параметра	Обозначение параметра	Размерность параметра	Размерность в системе СИ [MLTΘ]
Характеристики ТАМ				
1	Удельная теплоемкость	C_p	Дж/(кг · К)	$[\text{L}^2 \text{T}^{-2} \Theta^{-1}]$
2	Эффективная теплопроводность	λ	Вт/(м · К)	$[\text{MLT}^{-3} \Theta^{-1}]$
3	Плотность	ρ	кг/м ³	$[\text{M L}^{-3}]$
Характеристики ТАТ				
4	Масса ТАТ	m	кг	[M]
5	Площадь теплообмена ТАТ	S	м ²	$[\text{L}^2]$
6	Объем ТАТ	V	м ³	$[\text{L}^3]$
7	Коэффициент геометрической формы ТАТ	K_r	м ⁻¹	$[\text{L}^{-1}]$
Характеристики режима работы				
8	Разность температур ТАТ при нагреве и охлаждении	T	К	[Θ]
9	Время режима	τ	с	[T]
10	Удельное количество тепла в массе ТАТ	Q_m	Дж/кг	$[\text{L}^2 \text{T}^{-2}]$
11	Тепловой поток	q	Вт/м ²	$[\text{MT}^{-3}]$
12	Удельное количество тепла в объеме ТАТ	Q_v	Дж/м ³	$[\text{MT}^{-2} \text{L}^{-1}]$

Таблица 2

Базисные параметры

Table 2

Basic parameters

№ п/п	Название параметра	Обозначение	Размерность	[MLTΘ]
1	Масса ТАТ	m	кг	[M]
2	Коэффициент геометрической формы	K_r	m^{-1}	[L ⁻¹]
3	Время режима	τ	с	[T]
4	Разность температур	T	К	[Θ]

Удельное количество тепла в объеме:

$$[\text{Дж}/\text{м}^3] = [(\text{Н}/\text{м}^2)] = [\text{кг}/(\text{с}^2 \cdot \text{м})] = [\text{MT}^{-2}\text{L}^{-1}].$$

Коэффициент геометрической формы K_r – это отношение поверхности теплообмена ТА к его теплопоглощающему объему. Принято в [15] как характеристика формы объекта в тепловых задачах.

Согласно второй теореме подобия – теореме Бэкингема, получим критерии подобия для указанных величин, при следующих базисных параметрах, которые приведены в табл. 2, согласно рекомендаций [4].

Результаты

Далее получены критерии подобия для каждой из значимых величин, воспользовавшись рекомендациями, изложенными в [12]. Критерии подобия значимых величин приведены

в табл. 3. Полученные критерии безразмерны и характеризуют отдельные процессы и численно равны для различных структурных схем и конструкций ТА, согласно структуры приведенной на рис. 3. Далее воспользуемся третьей теоремой подобия и объединим критерии для различных режимов работы ТА. Были проверены различные сочетания критериев и отобраны наиболее адаптивные. Критерий считается адаптивным, если при изменении значений значимых параметров имеет наибольшее численное изменение своего значения.

Критерий эффективности заряда ТА равен:

$$\Pi_{\text{эфз}} = \Pi_{\lambda} \Pi_{Q_v} / (\Pi_{C_p} \Pi_{\rho} \Pi_q) = \alpha Q_v K_r / q, \quad (2)$$

где α – коэффициент температуропроводности, равен $\alpha = \lambda / (C_p \rho)$.

Таблица 3

Критерии подобия значимых величин

Table 3

Similarity criteria of significant quantities

№ п/п	Название параметра	Обозначение критерия	Выражение критерия
1	Критерий теплоемкости	Π_{C_p}	$C_p K_r^2 T \tau^2$
2	Критерий теплопроводности	Π_{λ}	$\lambda \tau^3 T K_r / m$
3	Критерий плотности	Π_{ρ}	$\rho / (m K_r^3)$
4	Критерий удельного количества тепла в массе	Π_{Q_m}	$Q_m K_r^2 \tau^2$
5	Критерий теплового потока	Π_q	$q \tau^3 / m$
6	Критерий удельного количество тепла в объеме	Π_{Q_v}	$Q_v \tau^2 / (m K_r)$

Значения критериев подобия для разных ТА

Table 4

The values of the similarity criteria for different HA

№ п/п	Название ТА	Критерий эффективности заряда, $\Pi_{\text{Эфз}}$	Критерий эффективности разряда, $\Pi_{\text{Эфр}}$	Критерий эффективности полный, Π_{Σ}
1	АЭТ 3,2 кВт	2 177	0,0006	1,33
2	АЭТ 4 кВт	2 415	0,0007	1,66
3	АЭТ В	1 859	0,0010	1,88
4	АЭТ ВВ	1 489	0,0075	11,13

Критерий эффективности заряда ТА характеризует эффективность достижения заданного значения удельного количества тепла в материале ТА при заряде, при принятых материалах, геометрических соотношениях ТА и теплового потока подводимого тепла.

Критерий эффективности разряда ТА равен:

$$\Pi_{\text{Эфр}} = \Pi_{C_p} \Pi_{\rho} \Pi_{Q_m} / (\Pi_{\lambda} \Pi_q) = m Q_m / (\alpha q \tau^2) = Q / (\alpha q \tau^2) \quad (3)$$

где Q – общее аккумулированное количество тепла в ТА.

Критерий эффективности разряда ТА характеризует эффективность разряда ТА при принятых материалах, массе ТАТ и общего аккумулированного количества тепла при установленном значении теплового потока от ТА и времени разряда.

Полный критерий эффективности равен:

$$\Pi_{\Sigma} = \Pi_{\text{Эфз}} \Pi_{\text{Эфр}} = Q_v K_r Q / (q^2 \tau^2) \quad (4)$$

Условно принимаем равенство плотностей теплового потока при заряде и разряде, также время заряда и разряда ТА. Указанные допущения позволят получить упрощенное решение для полного критерия эффективности. Упростим выражение (5), подставляя $Q_v = Q/V$, а также $V = S/K_r$ получим:

$$\Pi_{\Sigma} = K_r^2 Q^2 / (S q^2 \tau^2) \quad (5)$$

Полный коэффициент эффективности работы ТА характеризует эффективность работы ТА при заряде и разряде, т.е. за полный цикл. Далее упростим выражение (9) – возьмем из

указанного выражения квадратный корень, получим:

$$\Pi_{\Sigma} = \frac{K_r Q}{\sqrt{S} q \tau} = \frac{Q \sqrt{S}}{V q \tau} \quad (6)$$

Таким образом, полный коэффициент эффективности работы ТА зависит от полной емкости заряженного аккумулятора, геометрических соотношений ТАТ, теплового потока при выбранном режиме и времени выбранного режима. Свойства ТАМ, которые характеризуются коэффициентом температуропроводности, равным $\alpha = \lambda / (C_p \rho)$, обеспечивают аккумулирование необходимого количества тепла при заданных габаритах ТА. При рассмотрении полного цикла работы ТА свойства ТАМ на эффективность полного цикла не оказывают прямого влияния.

Значения критериев для исследуемых ТА приведены в табл. 4.

Научная новизна и практическая значимость

Критерии, приведенные в табл. 4 носят сравнительный характер. Можно считать, что заряд осуществится эффективнее для АЭТ 4 кВт, чем для всех остальных ТА, а разряд будет более эффективным для АЭТ В. Поскольку режимы ТА неотделимы друг от друга, то анализ полного критерия эффективности показывает, что АЭТ ВВ является наиболее эффективным устройством по сравнению с другими исследуемыми ТА с точки зрения цикла «Заряд – Разряд». Сравнение ТА, приведенное в табл. 4, показывает, что согласно полученных критериев

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

возможно сравнить близкие по принципам работы и сходным системам теплообмена ТА. Так, можно утверждать, что АЭТ 4 кВт, эффективнее по критерию заряда, а АЭТ ВВ эффективнее приведенных ТА по полному критерию эффективности (рассчитан по формуле 5).

Поскольку критерии подобия, по определению, отражают подобные тепловые процессы, происходящие в ТА – заряд и разряд, возможно, используя накопленный опыт, по проектированию ТА и численные значения критериев, приведенные в табл. 4, задавая, например, материалы и режимы работы ТА, определить его весогабаритные характеристики. Так для реализации режима заряда подобного АЭТ 4 кВт, например для проектируемого АЭТ с подключенной мощностью 10 кВт, задаем значение критерия заряда из табл. 4, выбираем материал, значения режимных параметров и определяем весогабаритные показатели проектируемого ТА, через коэффициент геометрической формы. Или наоборот, задавая весогабаритные характеристики проектируемого ТА, определяем критерий заряда, разряда или полный критерий эффективности.

Выводы

Анализ показывает, что предложенная методология оценки эффективности работы твердотельных тепловых аккумуляторов для разных режимов работы является эффективной, технически реализуемой и позволяет определить весогабаритные показатели и режимы работы твердотельного теплового аккумулятора на этапе проектирования. Предложенная методология применима при проектировании и сравнении тепловых аккумуляторов с подобными системами подвода и отвода тепла.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А. С. 1746151 СССР, МПК⁴ F 24 Н 7/00. Тепловой аккумулятор / Л. Л. Васильев, И. М. Болдак, Л. С. Домород, Е. И. Широков (СССР). – № 04800461/06 ; заявл. 14.12.89 ; опубл. 07.07.92, Бюл. № 25. – 1 с.
2. Беліменко, С. С. Електротеплоакумуляційні нагрівачі: шлях до енергонезалежності України / С. С. Беліменко // Праці ін-ту електродинаміки НАН. – К., 2006. – Спец. випуск. – С. 80–83.
3. Беліменко, С. С. Системи опалювання теплоакумуляційними нагрівачами / С. С. Беліменко // Екоінформ. – 2011. – № 6. – С. 18–19.
4. Браун, Э. Д. Моделирование трения и изнашивания в машинах / Э. Д. Браун, Ю. А. Евдокимов, А. В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 1982. – 191 с.
5. Веников, В. А. Теория подобия и моделирование применительно к задачам электроэнергетики / В. А. Веников. – М., 1966. – 182 с.
6. Габринець, В. О. Шляхи підвищення ефективності енергетичних підрозділів залізничного транспорту / В. О. Габринець, Є. В. Христьян, І. В. Титаренко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 41. – С. 187–190.
7. Дружинин, П. В. Математическая модель процесса разрядки теплового аккумулятора фазового перехода / П. В. Дружинин, А. А. Коричев, И. А. Косенков // Техн.-технол. пробл. сервиса. – 2009. – № 4. – С. 17–22.
8. Дружинин, П. В. Математическая модель процесса хранения теплоты в тепловом аккумуляторе / П. В. Дружинин, А. А. Коричев, И. А. Косенков // Техн.-технол. пробл. сервиса. – 2009. – № 2. – С. 63–65.
9. Каграманян, А. О. Оцінка економічної ефективності застосування прогріву тепловозів від альтернативних джерел енергії / А. О. Каграманян, А. В. Онищенко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – Вип. 32. – С. 259–263.
10. Левенберг, В. Д. Аккумулирование тепла / В. Д. Левенберг, М. Р. Ткач, В. А. Гольстрем. – К. : Техника, 1991. – 315 с.
11. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : Высш. шк., 1967. – 600 с.
12. Пат. 2088857 Российская Федерация, МПК⁴ F 24 Н 7/00. Тепловой аккумулятор фазового перехода / Бульчев В. В., Емельянов Е. С., Загряжкин В. Н. и др. ; заявитель и патентообладатель Бульчев В. В., Емельянов Е. С., Загряжкин В. Н. и др. – № 93036725/06 ; заявл. 16.07.93 ; опубл. 27.08.1997. – 1 с.
13. Резницкий, Л. А. Тепловые аккумуляторы / Л. А. Резницкий. – М. : Энергоатомиздат, 1996. – 91 с.
14. Филиппов, Л. П. Теория термодинамического подобия / Л. П. Филиппов. – М. : Изд-во МГУ, 1985. – 225 с.
15. Чичинадзе, А. В. Расчет и исследование внешнего трения при торможении / А. В. Чичинадзе. – М. : Наука, 1967. – 331 с.
16. Analysis on peak-load regulation ability of cogeneration unit with heat accumulator / Q. Lyu,

T. Chen, H. Wang et al. // Automation of electric Power System. – 2014. – Vol. 38. – Iss. 11, 10. – P. 34–41.

17. Taler, D. Water-air ceramic heat accumulator heating system for building / D. Taler, P. Cisec, J. Tokarzik // Runek Energy. – 2014. – Vol. 107. – Iss. 6. – P. 71–76.

С. С. БЕЛІМЕНКО^{1*}, В. О. ІЩЕНКО^{2*}

^{1*}ТОВ «Теплотехніка», вул. К. Маркса, 93, к. 227, Дніпропетровськ, Україна, 49000, тел./факс +38 (056) 33 33 06, ел. пошта director@teplotehnika.dp.ua, ORCID 0000-0002-9935-4778

^{2*}Каф. «Теплотехніка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 76, ел. пошта vladichsh@gmail.com, ORCID 0000-0002-5948-9483

РОЗРОБКА КРИТЕРІЇВ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАРЯДУ Й РОЗРЯДУ ТВЕРДОТІЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО АКУМУЛЯТОРА

Мета. В роботі необхідно здійснити розробку критеріїв подібності для різних режимів роботи твердотілого теплового акумулятора (ТА), що працює за рахунок накопичення теплової енергії в обсязі теплоакуюючого матеріалу без фазового переходу, а також створити комплексний критерій ефективності теплового акумулятора для визначення вагогабаритних показників і режимів його роботи на етапі проектування. **Методика.** Для досягнення цілей дослідження використані теорія подібності і аналіз розмірностей, а також методики планування проведення фізичного дослідження. **Результати.** На основі теорії подібності та аналізу розмірностей отримані критерії подібності роботи твердотілих теплових акумуляторів при заданих базисних параметрах. Це критерії ефективності заряду, розряду та повний критерій. Використані три теореми теорії подібності в питанні до вирішення теплотехнічної задачі. Критерій ефективності заряду теплового акумулятора характеризує ефективність досягнення заданого значення питомої кількості тепла в матеріалі теплового акумулятора при заряді, при прийнятих матеріалах, геометричних співвідношеннях і теплового потоку підведеного тепла. Критерій ефективності розряду характеризує ефективність розряду теплового акумулятора при прийнятих матеріалах, масі тіла, що акумулює, і загальної кількості акумульованого тепла при встановленому значенні теплового потоку і часу розряду. Повний коефіцієнт ефективності роботи теплового акумулятора характеризує ефективність роботи теплового акумулятора за повний цикл. **Наукова новизна.** Аналіз показав, що можлива реалізація будь-якої системи твердотілого теплового акумулятора на основі структурної схеми цього типу пристроїв. Отримані критерії подібності ефективності заряду, ефективності розряду та повний критерій ефективності роботи твердотілого теплового акумулятора на основі твердого матеріалу, що акумулює, без фазового переходу. **Практична значимість.** Критерії, наведені в даній роботі, носять порівняльний характер. Відповідно до отриманих критеріїв можна порівнювати близькі за конструкціями проєктовані й існуючі теплові акумулятори. Техніко-економічний аналіз показує, що запропонована методологія оцінки ефективності роботи твердотілих теплових акумуляторів в різних режимах роботи є ефективною, технічно реалізується і дозволяє визначити вагогабаритні показники та режими роботи твердотілого теплового акумулятора на етапі проектування.

Ключові слова: твердотілий тепловий акумулятор; твердий акумулюючий матеріал; ефективність заряду; ефективність розряду; теорія подоби; аналіз розмірностей й; критерій подоби

S. S. BELYMENKO^{1*}, V. O. ISHCHEKHO^{2*}

^{1*}LTD «Heating Engineering», K. Marks Av., 93, r. 227, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49000, tel./fax +38 (056) 33 33 06, e-mail director@teplotehnika.dp.ua, ORCID 0000-0002-9935-4778

^{2*}Dep. «Heating Engineering», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel./fax +38 (056) 373 15 76, e-mail vladichsh@gmail.com, ORCID 0000-0002-5948-9483

DEVELOPMENT OF CRITERIA OF CHARGE AND DISCHARGE EFFICIENCY OF SOLID STATE OF HEAT ACCUMULATOR

Purpose. Development of similarity criteria for different modes of operation of the solid-state heat accumulator working due to accumulation of heat in the volume of the heat storage material without phase transition, and the crea-

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

tion of systematic criteria of heat accumulator efficiency for determination the weight / size parameters and operating modes at the design stage. **Methodology.** To achieve the objectives of the study the theory of similarity and dimensional analysis were used as well as planning and carrying out techniques of physical experiments. **Findings.** Based on the theory of similarity and dimensional analysis similarity criteria operation of solid-state heat accumulators, under given basic parameters were obtained. These are performance criteria for charge, discharge and full criterion. Three theorems of similarity theory in application to the solution of engineering problems were used. The criterion of efficiency of the heat accumulator charge characterizes the effectiveness of achieving the specified value of the specific amount of heat in the material of heat accumulator under charge, under received materials, geometrical ratios, and heat flow of the heat input. The efficiency criterion characterizes the discharge efficiency of the heat accumulator, at the accepted materials; mass of heat-retainer and the total accumulated amount of heat when the value of the heat flow and the time of discharge. Full coefficient of the heat accumulator performance characterizes the efficiency of the heat accumulators for a full cycle. **Originality.** Accordingly to the analysis the implementation of any system of solid-state heat accumulator is possible on the basis of structural schemes of this type of device. The similarity criteria of the efficiency of the charge, the efficiency of discharge and the full criterion of solid-state heat accumulators' efficiency based on the solid storage material without phase transition were obtained. **Practical value.** Criteria presented in this work are of a comparative nature. In accordance with the obtained criteria we can compare designed and existing heat accumulators that are similar to structures. Feasibility analysis indicates that the proposed assessment methodology of solid-state heat accumulators' efficiency in different modes of operation is effective, technically feasible and allows determining the weight / size parameters and modes of operation of the solid-state heat accumulator at the design stage.

Keywords: solid-state heat accumulator; solid storage material; charge efficiency; discharge efficiency; similarity theory; dimensional analysis; similarity criterion

REFERENCE

1. Vasilyev L.L., Boldak I.M., Domorod L.S., Shirokov Ye.I. *Teplovoy akkumulyator* [Heat accumulator]. A.s.1746151 SSSR, no. 4800461/06, 1992.
2. Bielimenko S.S. Elektroteploakumulatsiini nahrivachi: shliakh do enerhonezalezhnosti Ukrainy [Electro-thermal and accumulative heaters is a way to nonvolatility of Ukraine]. *Pratsi instytutu elektrodynamiky NAN* [Proc. of The Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences in Ukraine], 2006, a special issue, pp.80-83.
3. Bielimenko S.S. Systemy opaliuvannia teplo akumulatsiinyh nahrivachamy [Heating systems with thermal energy storage heaters]. *Ekoinform – Ecoinform*, 2011, no. 6, pp.18-19.
4. Braun E.D., Yevdokymov Yu.A., Chichinadze A.V. *Modelirovaniye treniya i iznashivaniya v mashinakh* [Simulation of friction and wear in machines]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1982. 191 p.
5. Venikov V.A. *Teoriya podobiya i modelirovaniye primenitelno k zadacham elektroenergetiki* [Similarity theory and simulation as applied to problems of electricity]. Moscow, 1966. 182 p.
6. Habrynets V.O., Khrystian Ye.V., Tytarenko I.V. Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti enerhetychnykh pidrozdiliv zaliznychnoho transportu [Ways to improve the efficiency of energy units of railway transport]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 41, pp. 187-190.
7. Druzhinin P.V., Korichev A.A., Kosenkov I.A. Matematycheskaya model protsessa razryadky teplovogo akkumulyatora fazovogo perekhoda [A mathematical model of the heat accumulator discharge process of phase transition]. *Tekhniko-tehnologicheskiye problemy servisa – Technical and technological problems of service*, 2009, no. 4. pp. 17-22.
8. Druzhinin P.V., Korichev A.A., Kosenkov I.A. Matematicheskaya model protsessa khraneniya teploty v teplovom akkumulyatore [A mathematical model of the heat storage process in the heat accumulator]. *Tekhniko-tehnologicheskiye problemy servisa – Technical and technological problems of service*, 2009, no. 2. pp. 63-65.
9. Kahramanian A.O., Onyshchenko A.V. Otsinka ekonomichnoi efektyvnosti zastosuvannia prohrivu teplovoziv vid alternatyvnykh dzherel enerhii [Assessment of the economic efficiency of locomotives warm-up from alternative energy sources]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 32, pp. 259-263.
10. Levenberh V.D., Tkach M.R., Holstrem V.A. *Akkumulirovaniye tepla* [Heat accumulation]. Kyiv, Tekhnika Publ., 1991. 315 p.

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

11. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [The theory of heat conduction]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1967. 600 p.
12. Bulychov V.V., Yemelyanov Ye.S., Zagryazkin V.N. *Teplovoyye akkumulyator fazovogo perekhoda* [Heat storage of phase transition]. Patent RU, no. 93036725/06, 1997.
13. Reznitskiy L.A. *Teplovyye akkumulyatory* [Heat accumulators]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1996. 91 p.
14. Filippov L.P. *Teoriya termodinamicheskogo podobiya* [The theory of thermodynamic similarity]. Moscow, Izdatelstvo MGU Publ., 1985. 225 p.
15. Chichinadze A.V. *Raschet i issledovaniye vneshnego treniya pri tormozhenii* [Calculation and investigation of external friction during braking]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 331p.
16. Lyu Q., Chen T., Wang H., Yu T., Li Q., Tang W. Analysis on peak-load regulation ability of cogeneration unit with heat accumulator. *Automation of electric Power System*, June 2014, vol. 38, issue 11, 10, pp. 34-41.
17. Taler D., Cisec P., Tokarzik J. Water-air ceramic heat accumulator heating system for building. *Runeek Energy*, 2014, vol. 107, issue 6, pp. 71-76.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Л. И. Кныш (Украина); д.т.н., проф. В. А. Габринцом (Украина)

Надійшла до редколегії: 20.06.2014

Прийнята до друку: 20.09.2014