

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ АККУМУЛЯТОРОВ ТЕПЛОТЫ  
ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ПУТЕМ И  
МЕТОДОМ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА**

*Е. А. Антипов, кандидат технических наук, старший преподаватель  
Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины*

*E-mail: [ievgeniy\\_antypov@ukr.net](mailto:ievgeniy_antypov@ukr.net)*

**Аннотация.** *Целью настоящего исследования являлась оценка эффективности работы аккумуляторов теплоты фазового перехода методом эксергетического анализа. Ранее проведенные автором статьи экспериментальные исследования показали, что аккумуляторы теплоты фазового перехода имеют определенные недостатки. Основным из них можно назвать довольно низкие «разрядные» характеристики, что объяснимо низким коэффициентом теплопроводности шара затвердевшего аккумулирующего материала, образующегося около теплообменных конструкций на начальном этапе работы аппарата в режиме «разряд». Происходит «закрытие» оттока теплоты от внутренних шаров к теплообменным конструкциям. Для оценки эффективности работы аккумуляторов теплоты фазового перехода, взята конструкция аккумулятора теплоты на основе парафина, которая представляет собой изготовленную из стали, заполненную твердым теплоаккумулирующим материалом фазового перехода, горизонтально ориентированную емкость (корпус) в форме параллелепипеда. В качестве цилиндрического источника теплоты использовано трубный пучок, состоящий из 8-ми стальных труб, расположенных по центру емкости параллельно ко дну корпуса модуля. Система запорной арматуры позволяет комбинировать различные варианты размещения нагревательных труб: шахматное или коридорное их расположение в теплоаккумуляторе. Полученные методом эксергетического анализа результаты соответствуют данным экспериментальных исследований, которые показали, что температура глубинных слоев выше от температуры слоя закристаллизованного аккумулирующего материала. В заключение сделан вывод о необходимости улучшения условий «заряда», проведение мероприятий по интенсификации процессов теплоотвода и хранения тепловой энергии путем применения как развитых поверхностей теплообмена, так и новых, более эффективных теплоизоляционных материалов.*

**Ключевые слова:** *аккумулятор теплоты, эксергетический анализ, аккумулирующий материал, заряд, разряд*

**Актуальность.** Ограниченность традиционных топливно-энергетических ресурсов (газообразного, жидкого и твердого топлива), постоянный рост цен на них, а также негативное влияние продуктов их сгорания на окружающую среду свидетельствуют о необходимости более рационального их использования, которое может быть достигнуто как за счет использования современного энергосберегающего оборудования, так и создания и практического применения аккумуляторов энергии различных типов, что позволит не только повысить эффективность использования тепловой и электрической энергии, но и снизить ее стоимость.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Известно, что из всех типов существующих конструкций теплоаккумуляторов наиболее перспективными являются аккумуляторы теплоты с фазовыми или химическими превращениями аккумулирующего материала, которые позволяют обеспечить высокую плотность накопленной энергии и стабильную температуру на выходе из теплового аккумулятора. Однако, анализ работ [1, 2] показал, что такие аппараты имеют определенные недостатки. Основным из них можно назвать довольно низкие «разрядные» характеристики, что объяснимо низким коэффициентом теплопроводности шара затвердевшего аккумулирующего материала, образующегося около теплообменных конструкций на начальном этапе работы аппарата в режиме «разряд». Происходит «закрытие» оттока теплоты от внутренних шаров к теплообменным конструкциям. Последнее указывает на необходимость проведения новых исследований направленных на анализ различных рабочих характеристик таких аккумуляторов.

**Цель исследования** – оценка эффективности работы аккумуляторов теплоты фазового перехода экспериментальным путем и методом эксергетического анализа.

**Материалы и методы исследования.** Для проведения анализа эффективности работы аккумуляторов теплоты фазового перехода как первым, так и вторым методом необходимо знать особенности поведения сред, в которых осуществляется фазовый переход из твердой фазы в жидкую и обратно. Такие

процессы описываются одномерными нелинейными задачами теории теплопроводности, которые называют задачами стефановского типа [3], основным постулатом которой является наличие фронта фазового перехода, разделяющего твердую от жидкой фазы. Авторами работы [4] проведен эксергетический анализ аккумулятора теплоты фазового перехода при различных режимах его работы, а также с учетом определенных особенностей процесса нагрева (плавления) и охлаждения (кристаллизации) теплоаккумулирующего материала в таком теплоаккумуляторе. В частности учтено, что нагрев теплоаккумулирующего материала до температуры фазового перехода, дальнейший его нагрев в процессе осуществления им фазового перехода, после осуществления фазового перехода, дальнейший физический прогрев жидкого теплоаккумулирующего материала до установленного конечного значения температуры его нагрева, опишется так:

$$M_{там} = \frac{Q_{н2}}{\Delta h + (c_{там\ тв} \cdot \Delta T_{тв}) + (c_{там\ тв-ж} \cdot \Delta T_{тв-ж}) + (c_{там\ ж} \cdot \Delta T_{ж})} = \frac{Q_{н2}}{\Delta h + c_p}, \quad (1)$$

где  $M_{там}$  – масса теплоаккумулирующего материала, кг;  $c_{там\ п}$ ,  $c_{там\ тв}$  – теплоемкость материала, соответственно в твердой и жидкой фазах, Дж/(кг·К);  $\Delta h$  – удельная теплота фазового перехода аккумулирующего материала, Дж/кг;  $\Delta T$  – изменение температуры (повышение температуры материала при «зарядке» аккумулятора теплоты), К;  $c_p$  – эффективная теплоемкость материала, что определяется: или по положениям [5]. При этом, исходным параметром является температура  $T_{\phi}$  плавления аккумулирующего материала, К.

Суммарный энергетический КПД  $\eta_{\Sigma}$  равен соотношению количества энергии  $Q_p$ , Дж, которая отводится при «разряде» аккумулятора теплоты фазового переходу к энергии, которая подводится при «заряде»  $Q_3$ , Дж, а именно [4]:

$$\eta_{\Sigma} = Q_p/Q_3. \quad (2)$$

Составляющими  $\eta_{\Sigma}$  в процессе расчета на основании положений [4, 6] будут:

$$\eta_1 = Q_{н1}/Q_3, \quad (3)$$

$$\eta_2 = Q_{H2}/Q_{H1}, \quad (4)$$

$$\eta_3 = Q_p/Q_{H2}, \quad (5)$$

а проверка проводится по формуле:

$$\eta_{\Sigma} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3, \quad (6)$$

где  $\eta_{\Sigma}$  – суммарный КПД аккумулятора теплоты фазового перехода;  $\eta_1$  – КПД периода «заряда» теплоаккумулятора;  $\eta_2$  – КПД хранения накопленной энергии;  $\eta_3$  – КПД «разряда» аккумулятора теплоты фазового перехода.

Эксергию (то есть максимальную работоспособность) тепловой энергии определяем по положениям [4, 6], а именно:

$$\mathcal{E} = Q \cdot (T - T_{oc})/T, \quad (7)$$

где  $\mathcal{E}$  – эксергия, которая подводится (отводится), Дж;  $Q$  – энергия, которая подводится (отводится), Дж;  $T$  – температура тела, к которому теплота подводится (отводится), К;  $T_{oc}$  – температура окружающей среды, К.

Эксергия, которая подводится при «заряде» аккумулятора теплоты фазового перехода определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_3 = Q_3 \cdot (1 - T_{oc}/T_{вх.в}), \quad (8)$$

где  $T_{вх.в}$  – температура теплоподвода в аккумуляторе теплоты, К.

Накопленная эксергия при «заряде»  $\mathcal{E}_{H1}$  по положениям [4, 6] определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{H1} = Q_{H1} \cdot (1 - T_{oc}/T_{\phi}), \quad (9)$$

где  $T_{\phi}$  – температура фазового преобразования аккумулирующего материала, К.

Эксергия после периода хранения энергии  $\mathcal{E}_{H2}$  в аккумуляторе теплоты фазового перехода на основании положений [4, 6] определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{H2} = Q_{H2} \cdot (1 - T_{oc}/T_{\phi}). \quad (10)$$

Отведенная от теплоаккумулятора эксергия при «разряде»  $\mathcal{E}_p$  на основании положений [4, 6] определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_p = Q_p \cdot (1 - T_{oc}/T_{вых.в}), \quad (11)$$

где  $T_{вых.в}$  – температура теплоотвода от аккумулятора теплоты фазового перехода, К.

Суммарный эксергетический КПД теплоаккумулятора определяем на основании положений [4, 6], а именно:

$$\psi_{\Sigma} = \mathcal{E}_p / \mathcal{E}_3 = \eta_{\Sigma} \cdot (1 - T_{oc} / T_{вых.в}) / (1 - T_{oc} / T_{вх.в}). \quad (12)$$

В свою очередь  $\psi_{\Sigma} = \psi_1 \cdot \psi_2 \cdot \psi_3$ , тогда:

$$\psi_1 = \mathcal{E}_{н1} / \mathcal{E}_3 = \eta_1 \cdot (1 - T_{oc} / T_{ф}) / (1 - T_{oc} / T_{вх.в}). \quad (13)$$

На этапе хранения накопленной теплоты из-за потерь сквозь стенки аккумулятора теплоты фазового перехода происходит процесс отвердевания некой части аккумулирующего материала, причем температура остается постоянной.

Эксергетический КПД на данном, этапе по положениям [4, 6], будет равным энергетическому:

$$\psi_2 = \mathcal{E}_{н2} / \mathcal{E}_{н1} = \eta_2. \quad (14)$$

Кроме этого:

$$\psi_3 = \mathcal{E}_p / \mathcal{E}_{н2} = \eta_2 \cdot (1 - T_{oc} / T_{вых.в}) / (1 - T_{oc} / T_{ф}). \quad (15)$$

**Результаты исследования и их обсуждение.** Используя описанную выше методику проведения эксергетического анализа, в качестве примера, для оценки эффективности работы аккумуляторов теплоты фазового перехода, взята конструкция аккумулятора теплоты на основе парафина [7], которая представляет собой изготовленную из стали, заполненную твердым теплоаккумулирующим материалом фазового перехода, горизонтально ориентированную емкость (корпус) в форме параллелепипеда. В качестве цилиндрического источника теплоты использовано трубный пучок, состоящий из 8-ми стальных труб ( $d_{вн} = 21,3 \times 2,8$  мм), расположенных по центру емкости параллельно ко дну корпуса модуля. Система запорной арматуры позволяет комбинировать различные варианты размещения нагревательных труб: шахматное или коридорное их расположение в теплоаккумуляторе.

Также были использованы результаты ранее проведенных экспериментальных исследований [1, 2] указанной конструкции аккумулятора теплоты, которые частично представлены в таблице.

## Результаты экспериментальных исследований и эксергетического анализа аккумулятора теплоты фазового перехода

Время работы, час.	Температура материала, °С:		Тепловой поток, Вт:		Эксергия, Вт:	
	плавление	кристаллизация	«заряда»	«разряда»	«заряда»	«разряда»
1	30,13	61,60	1219,80	719,13	793,13	371,87
2	39,23	58,80	1125,53	709,41	830,08	181,69
3	45,10	56,15	1101,49	702,66	812,35	101,54
4	51,40	53,50	1096,45	474,96	808,63	53,25
5	57,70	51,38	1091,08	467,63	804,67	0,00
6	61,63	49,03	1081,44	466,00	797,56	0,00
7	64,63	46,75	1078,10	0,00	795,10	0,00
8	66,78	44,45	1073,19	0,00	791,48	0,00

Анализ данных [1, 2] и таблицы свидетельствует о том, что при снижении значений температуры теплоносителя наблюдается как падение теплового потока, так и коэффициента теплоотдачи при «разряде» теплоаккумулятора. Кроме того, при полном отвердении материала между ним и теплообменной поверхностью наблюдается образование воздушного зазора, что уменьшает эффективность использования интенсификаторов поверхности теплообмена в виде армированных конструкций и объясняет невысокие разрядные характеристики кожухотрубного теплоаккумулятора известной конструкции. Указанное соответствует результатам исследований, которые получены авторами работы [8], в которой определено, что использования гладких теплообменных поверхностей при работе аккумулятора теплоты фазового перехода в режиме «разряд», снижает эффективность процесса отбора аккумулированной теплоты с глубинных слоев материала.

**Выводы и перспективы.** На основе проведенного эксергетического анализа эффективности работы аккумуляторов теплоты на основе парафина с учетом данных экспериментальных исследований можно сделать вывод о необходимости улучшения условий «заряда» аккумуляторов теплоты фазового перехода, проведения мероприятий по интенсификации процессов теплоотвода и хранения тепловой энергии путем применения как новых развитых поверхностей теплообмена, так и более эффективных теплоизоляционных материалов.

### Список использованных источников

1. Антипов Е.А. Экспериментальное исследование процессов фазового перехода в теплоаккумулирующих материалах органического происхождения [Текст] / Е.А. Антипов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства. – 2015. – № 3 (20). – С. 44–49.
2. Антипов Е.А. Экспериментальное исследование эффективности новой конструкции аккумулятора теплоты фазового перехода [Текст] / Е.А. Антипов // Вестник Национального университета биоресурсов и природопользования Украины. Серия «Техника и энергетика АПК». – 2015. – Вып. 209, ч. 2. – С. 253–257.
3. Рубинштейн Л.И. Проблема Стефана [Текст] / Л.И. Рубинштейн. – Рига: Звайгзне, 1970. – 232 с.
4. Грицук И.В. Алгоритм и программа эксергетического анализа теплового аккумулятора фазового перехода системы прогрева транспортного двигателя [Текст] / И.В. Грицук, Ю.В. Грицук, Ю.В. Черняк // Сборник науч. работ ДонИЖД. – Донецк: ДонИЖД. – 2014. – Вып. № 39. – С. 111–126.
5. Александров В.Д. Тепловые аккумуляторы фазового перехода для транспортных средств: параметры рабочих процессов: монография [Текст] / В.Д. Александров, Ю. Ф. Гутаревич, И.В. Грицук [и др.]. – Донецк: Ноулидж (Донецкое отделение), 2014. – 230 с.
6. Куколев М.И. Оценка эффективности использования массы теплового аккумулятора [Текст] / М.И. Куколев // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. – Петрозаводск: Изд. ПетрГУ, 1996. – С. 40–42.
7. Антипов, Е.А. Экспериментальное исследование основных режимов работы низкотемпературных аккумуляторов теплоты фазового перехода кожухотрубного типа [Текст] / Е.А. Антипов // Вестник Харьковского национального технического университета сельского хозяйства имени Петра Василенко. Серия «Технические науки». – 2015. – № 164. – С. 101–103.
8. Антипов Е.А. Экспериментальное исследование эффективности разрядных характеристик аккумулятора теплоты фазового перехода с гладкой теплообменной поверхностью [Текст] / Е.А. Антипов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства. – 2016. – № 1 (16). – С. 196–200.

### References

1. Antypov, I. O. (2015). Eksperimental'noye issledovaniye protsessov fazovogo perekhoda v teploakkumuliruyushchikh materialakh organicheskogo proiskhozhdeniya [Experimental studies of phase transition in the heat storage materials of organic origin]. Bulletin of the All-Russian Research Institute for Electrification of Agriculture, 3 (20), 44–49.
2. Antypov, I. O. (2015). Eksperymental'ne doslidzhennya efektyvnosti novoyi konstruktsiyi akumulyatora teploty fazovoho perekhodu [Experimental study of the effectiveness of the new design of heat power phase transition]. Scientific Journal NUBiP Ukraine, 209 (2), 253–257.

3. Rubinstein, L.I. (1970). Problema Stefana [Stefan problem]. *Zvayzgne*, 232.
4. Gritsuk, I.V., Gritsuk Y.V., Chernyak Y.V. (2014). Algoritm i programma eksergeticheskogo analiza teplovogo akkumulyatora fazovogo perekhoda sistemy progreva transportnogo dvigatelya [The algorithm and the program exergetic analysis of the phase transition heat storage system warm vehicle engine]. *Collection of Science Donetsk Institute of Railway Works*, 39, 111–126.
5. Aleksandrov, V.D., Gutarevich Y.F., Gritsuk I.V. (2014). Teplovyye akkumulyatory fazovogo perekhoda dlya transportnykh sredstv: parametry rabochikh protsessov [The thermal phase transition batteries for vehicles: workflow settings]. *Donetsk*, 230.
6. Kukolev, M.I. (1996). Otsenka effektivnosti ispol'zovaniya massy teplovogo akkumulyatora [Evaluating the effectiveness of the use of the thermal mass of the battery]. *Proceedings of the Faculty of Forest Engineering PetrSU*, 40–42.
7. Antypov, I.A. (2015). Eksperimental'noye issledovaniye osnovnykh rezhimov raboty nizkotemperaturnykh akkumulyatorov teploty fazovogo perekhoda kozhukhotrubnogo tipa [Experimental study of the major modes of low-temperature heat accumulators phase transition shell and tube-type]. *J. Kharkov National Technical University of Agriculture named after Peter Vasilenko*, 164, 101–103.
8. Antypov, I. O. (2016). Eksperimental'noye issledovaniye effektivnosti razryadnykh kharakteristik akkumulyatora teploty fazovogo perekhoda s gladkoy teploobmennoy poverkhnost'yu [Experimental study of the efficiency of the battery discharge characteristics of heat of phase transition with a smooth heat exchange surface]. *Bulletin of the All-Russian Research Institute for Electrification of Agriculture*, 1 (16), 196–200.

## **ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ АКУМУЛЯТОРІВ ТЕПЛОТИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДУ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМ ШЛЯХОМ І МЕТОДОМ ЕКСЕРГЕТИЧНОГО АНАЛІЗУ**

*Є. О. Антипов*

**Анотація.** *Метою цього дослідження є оцінка ефективності роботи акумуляторів теплоти фазового переходу методом ексергетичного аналізу. Раніше проведені автором статті експериментальні дослідження показали, що акумулятори теплоти фазового переходу мають певні недоліки. Основним з них можна назвати досить низькі «розрядні» характеристики, що можна пояснити низьким коефіцієнтом теплопровідності шару затверділого акумулюючого матеріалу, що утворюється навколо теплообмінних конструкцій на початковому етапі роботи апарату в режимі «розряд». Відбувається «закриття» відтоку теплоти від внутрішніх шарів до теплообмінних конструкцій. Для оцінки ефективності роботи акумуляторів теплоти фазового переходу, взята конструкція акумулятора теплоти на основі парафіну, яка являє собою виготовлену зі сталі, заповнену твердим теплоакumuлюючим матеріалом фазового переходу, горизонтально орієнтовану ємність (корпус) в*



формі паралелепіпеда. Як циліндричне джерело теплоти використано трубний пучок, що складається з 8-ми сталевих труб, розташованих по центру ємності паралельно до дна корпусу модуля. Система запірної арматури дозволяє комбінувати різні варіанти розміщення нагрівальних труб: шахове або коридорне їх розташування в теплоаккумуляторі. Отримані методом ексергетичного аналізу результати відповідають даним експериментальних досліджень, які показали, що температура глибоких шарів вище від температури шару закристалізованого акумулюючого матеріалу. На закінчення, зроблено висновок про необхідність поліпшення умов «заряду», проведення заходів з інтенсифікації процесів тепловідведення та зберігання теплової енергії шляхом застосування як розвинених поверхонь теплообміну, так і нових, більш ефективних теплоізоляційних матеріалів.

**Ключові слова:** *аккумулятор теплоти, ексергетичний аналіз, акумулюючий матеріал, заряд, розряд*

## **EVALUATING THE PERFORMANCE OF HEAT ACCUMULATORS OF PHASE TRANSITIONS BY EXPERIMENTAL PATH AND METHOD OF EXERGY ANALYSIS**

**I. Antypov**

**Abstract.** *The aim of this study was to evaluate the heat accumulator of the phase transition heat exergy analysis method. Earlier experimental studies by the author have shown that the latent heat accumulators have certain disadvantages. The main of them are quite low «bit» characteristics that explained the low thermal conductivity of the hardened ball accumulating material formed near the heat-exchange structures in the initial stage of operation of the machine in the «discharge» mode. There is a «closing» the outflow of heat from the inner ball to the heat exchanger designs. To estimate the efficiency of the heat of phase transition of heat accumulator, the paraffin wax accumulator is constructed, which is a horizontally oriented container (body) in the form of a parallelepiped made of steel filled with a solid heat-accumulating material of a phase transition. As a cylindrical heat source, a tube bundle consisting of 8 steel tubes located at the center of the container parallel to the bottom of the module housing is used. The shut-off valve system allows you to combine various options for placing heating pipes: a chess or corridor location in a heat accumulator. The resulting method of exergy analysis results are consistent with experimental studies, which showed that the temperature of the deep layers above the temperature of the storage material crystallized layer. As a result, the conclusion about the need to improve the conditions of the «charge» event for the intensification of the processes of heat removal and thermal energy storage through the use of heat exchange surfaces in both developed as well as new, more efficient thermal insulation materials.*

**Key words:** *heat accumulator, exergy analysis, accumulating material, charge, discharge*