

УСЛОВИЕ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ В ПРОТОЧНЫХ АККУМУЛЯТОРАХ ТЕПЛОТЫ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА

Н.А. Россихин¹

rossn@bmstu.ru

А.Г. Чукаев²

chukaev43@mail.ru

Д.А. Макаренков³

makarenrovd@mail.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

² ИМАШ РАН НЦ НВМТ, Москва, Российская Федерация

³ НИЦ КИ — ИРЕА, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Поддержание постоянной температуры теплоносителя на выходе в проточных аккумуляторах теплоты фазового перехода, близкой к температуре фазового перехода, обеспечивается при достаточно интенсивном теплообмене между теплоносителем и поверхностью фазового перехода. Вместе с тем значение отклонения температуры теплоносителя на выходе меньше допустимого не всегда можно обеспечить в течение всего периода осуществления фазового перехода. Для аккумуляторов постоянного поперечного сечения с постоянными по длине теплотехническими характеристиками получено аналитическое решение, позволяющее рассчитать момент времени, начиная с которого отклонение температуры теплоносителя на выходе от температуры фазового перехода становится больше допустимого. Оно применимо для расчета многих проточных аккумуляторов теплоты фазового перехода (кожухотрубных, капсульных и др.), использующих сложную конфигурацию теплообменных поверхностей. Для его вывода использовано аналитическое квазистационарное решение, соответствующее идеальному случаю, когда термическое сопротивление в фазопереходном материале мало. В этом случае достаточно большая интенсивность протекания процесса обеспечивается выбором соответствующих конструктивных параметров на этапе проектирования. Полученное аналитическое решение описывает процесс зарядки и разрядки в аккумулято-

Ключевые слова

Аккумулятор теплоты, затвердевание, плавление, фазовый переход, твердая фаза

Введение. Использование аккумуляторов теплоты позволяет оптимизировать энергопотребление и снижать потери энергии. Вопросы разработки и продвижения идеи их более широкого применения известны достаточно давно [1–4]. Наибольшее распространение получили аккумуляторы теплоты фазового перехода (АФП), применение которых особенно эффективно в альтернативной энергетике. В энергетическом оборудовании используют аккумуляторы с промежуточным теплоносителем, осуществляющим перенос теплоты с использованием жидкого или газообразного теплоносителя. Схемы кожухотрубного и капсульного АФП приведены на рис. 1, а, б. Проточные АФП различной конструкции детально рассмотрены в [5–14].

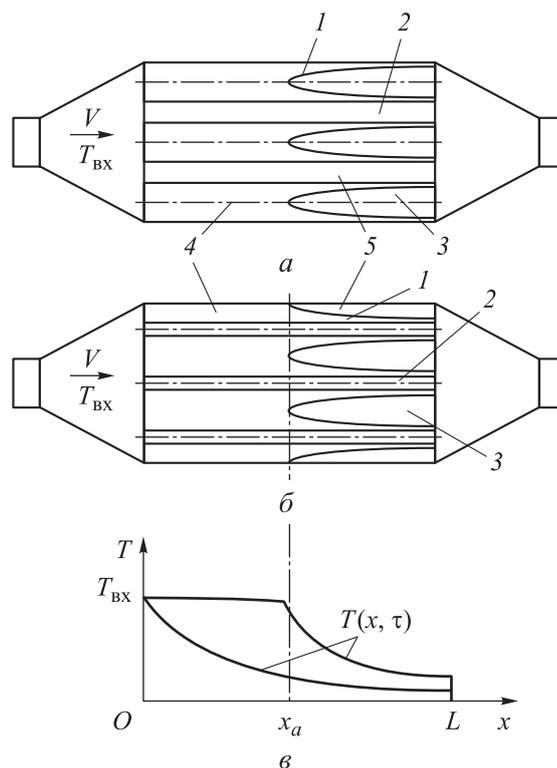


Рис. 1. Схемы капсульного (а) и кожухотрубного (б) АФП, температурное поле (в):

1 — граница раздела фаз; 2 — теплоноситель; 3 — фазопереходный материал (ФПМ);
4, 5 — зоны ФПМ в однофазном и двухфазном состояниях

Преимущества проточных АФП, включаемых в энергосистемы, — простота их эксплуатации и возможность обеспечения постоянства температуры потока теплоносителя на выходе $T_{\text{вых}} \approx T_{\text{ф}} = \text{const}$, где $T_{\text{ф}}$ — температура фазового перехода теплоаккумулирующего материала. Так, в [14] исследована возможность термостатирования среды для обеспечения комфортной температуры воздуха в помещениях с использованием аккумулятора, включенного в отопительно-вентиляционную систему.

Для обеспечения термостатирования в аккумуляторе необходим определенный набор параметров. Их выбор может быть осуществлен численным счетом с проведением вариантных расчетов [14] или экспериментальным исследованием, что требует привлечения значительных материальных ресурсов. В связи с этим предварительный выбор параметров целесообразно осуществлять, имея аналитическое решение, которое, при менее точном описании процессов, происходящих в АФП, позволяет провести быстрый анализ процессов фазового перехода в конструкции и определить примерную область приемлемых вариантов решения.

Особенности физико-математического описания процессов в проточных аккумуляторах теплоты фазового перехода. С использованием выведенной в [15] системы дифференциальных уравнений из [16] получено аналитическое решение задачи теплообмена для АФП с постоянным поперечным сечением и одинаковой по его длине конфигурацией поверхностей теплообмена. Оно позволяет проводить анализ работы проточных АФП с термостатированием теплоносителя.

Аналитическое решение для теплоносителя выражается зависимостью

$$T(x, \tau) = T_{\text{ф}} + (T_{\text{вх}}(\tau) - T_{\text{ф}}) \exp\left(-\frac{A'(x - x_a(\tau))}{\rho c_p V R}\right). \quad (1)$$

Здесь $T_{\text{вх}}(\tau)$ — заданная температура теплоносителя на входе; $T_{\text{ф}}$ — температура фазового перехода; A' — производная площади поверхности теплообмена со стороны теплоносителя на отрезке $[0, x]$ по оси x ; x_a — координата разделяющей плоскости; ρ, c_p, V — плотность, изобарная теплоемкость, объемный расход теплоносителя; R — общее термическое сопротивление.

В начальной стадии, когда фазовый переход происходит по всей длине аккумулятора (при $\tau \leq \tau_n$, τ, τ_n — время и время окончания начальной стадии), координата x_a плоскости, разделяющей однофазную и двухфазную зоны АФП (см. рис. 1), равна нулю: $x_a(\tau) = 0$.

В конечной стадии при $\tau > \tau_H$ координата разделяющей плоскости составляет

$$x_a(\tau) = \frac{c_p \rho V}{m_0 Q_\Phi} \int_{\tau_H}^{\tau} |T_{\text{вх}}(\tau) - T_\Phi| d\tau, \quad (2)$$

где $m_0(x) = m(x, 0) = \frac{\partial M}{\partial x} = \frac{\rho_{\text{ж}} dV_{\text{ак}}}{dx} = \rho_{\text{ж}} A_{\text{ак}}(x) (1 - \varepsilon(x) - \varepsilon_w)$, $\rho_{\text{ж}}$, $\rho_{\text{тв}}$ — плотность жидкой и твердой фаз фазопереходного материала (ФПМ), $A_{\text{ак}}$ — площадь поперечного сечения аккумулятора; ε — отношение объема теплоносителя к объему АФП (в случае засыпки аккумулятора капсулами с ФПМ ε называется пористостью); ε_w — отношение объема перегородки (оболочки) к объему аккумулятора; Q_Φ — теплота фазового перехода.

Удельная на единицу длины аккумулятора масса остатка фазы m определяется соотношением [15]:

$$m(x, \tau) = \frac{\partial M}{\partial x},$$

где $M(x, t)$ — масса остатка фазы между поперечным сечением на входе и сечением, определяемым координатой x .

Предполагается заливка всей полости аккумулятора жидкой фазой ($\rho_{\text{ж}} < \rho_{\text{тв}}$).

Время окончания начальной стадии определяется из соотношения

$$\left| \int_0^{\tau_H} T_{\text{вх}}(\tau) d\tau - T_\Phi \tau_H \right| = \frac{m_0 Q_\Phi R}{A'}. \quad (3)$$

С учетом того что толщина оболочки мала, доля объема оболочки в объеме АФП может быть вычислена по формуле:

$$\varepsilon_w = \frac{\delta_w dA}{dV_{\text{ак}}(x)} = \frac{A' \delta_w}{A_{\text{ак}}},$$

где δ_w — толщина оболочки, отделяющей ФПМ от теплоносителя; A — площадь поверхности теплообмена со стороны теплоносителя от входного сечения до сечения, определяемого координатой x ; $V_{\text{ак}}(x)$ — объем аккумулятора.

Общее термическое сопротивление определяется соотношением

$$\frac{dQ}{dA} = - \frac{T(x, \tau) - T_\Phi}{R},$$

где Q — поток теплоты к поверхности фазового перехода от теплоносителя.

Общее термическое сопротивление R включает в себя три составляющие (рис. 2): $R = R_f + R_w + R_\phi$, где $R_f = 1/\alpha_f$ — термическое сопротивление между теплоносителем и поверхностью оболочки; R_w — термическое сопротивление оболочки, разделяющей ФПМ и теплоноситель; R_ϕ — термическое сопротивление между внутренней поверхностью оболочки и границей фазового перехода в ФПМ.

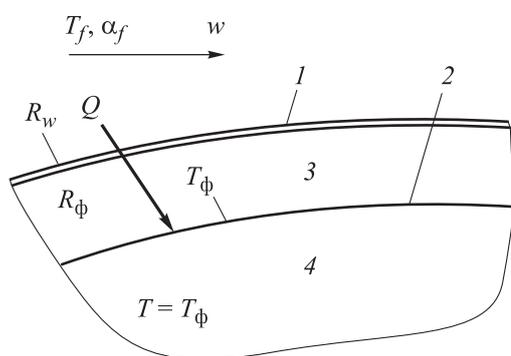


Рис. 2. Схема теплообмена между теплоносителем и ФПМ в АФП:

- 1 — поверхность теплообмена;
- 2 — граница раздела фаз;
- 3, 4 — фазы 1 и 2

Соотношения (1)–(3) получены с использованием следующих допущений:

- поток теплоносителя одномерный;
- теплообмен в ФПМ и потоке теплоносителя квазистационарный, накопление теплоты в фазах не учитывается;
- температура $T_{вх}(\tau)$ на входе в АФП изменяется медленно;
- геометрические и физические параметры постоянны;
- аккумулятор в начале процесса полностью заряжен или разряжен, т. е. ФПМ находится в однофазном состоянии при температуре фазового перехода;
- термическое сопротивление между внутренней поверхностью капсулы и границей фазового перехода в ФПМ пренебрежимо мало ($R_\phi / R \rightarrow 0$).

Последнее допущение означает, что $R_\phi \approx 0, R \approx \text{const}$. При расчетах выбирается $R = R_{ср}$.

Большинство из перечисленных допущений используется во многих работах, посвященных моделированию процессов в проточных АФП конкретного типа с поверхностью теплообмена определенной геометрии [1, 5, 14]. В этом случае математическое описание представляет собой систему одномерных дифференциальных уравнений, которые в дальней-

шем решаются численно или аналитически. Основное отличие используемого в таком случае аналитического решения состоит в его применимости для широкого класса проточных АФП, в том числе и для рассматриваемых в [1, 5, 14], и в использовании условия $R_{\phi} / R \rightarrow 0$, означающем идеальность теплопереноса в ФПМ.

Аналитическое решение задачи термостатирования в проточных аккумуляторах теплоты фазового перехода. Условие термостатирования потока теплоносителя может быть записано в виде

$$|\Delta T_{\text{ВЫХ}}(\tau)| = |T_{\text{ВЫХ}}(\tau) - T_{\phi}| \leq \Delta T_{\text{СТ}}, \quad (4)$$

где $\Delta T_{\text{СТ}}$ — максимально допустимое отклонение от температуры фазового перехода, задаваемое проектировщиком.

Подстановка (1) в (4) приводит к соотношению:

$$|\Delta T_{\text{ВЫХ}}(\tau)| = |\Delta T(L, \tau)| = |T_{\text{ВХ}}(\tau) - T_{\phi}| \exp\left(-\frac{A'(L - x_a(\tau))}{\rho c_p VR}\right) \leq \Delta T_{\text{СТ}}, \quad (5)$$

откуда

$$-\frac{A'(L - x_a(\tau))}{\rho c_p VR} \leq \ln \theta_{\text{СТ}}(\tau), \quad (6)$$

$$0 \leq -x_a(\tau) + L + \frac{\rho c_p VR}{A'} \ln \theta_{\text{СТ}}(\tau), \quad (7)$$

где

$$\theta_{\text{СТ}}(\tau) = \frac{\Delta T_{\text{СТ}}}{|T_{\text{ВХ}}(\tau) - T_{\phi}|}.$$

Термостатирование может осуществляться в течение всего периода зарядки или разрядки АФП. Для этого необходимо выполнение условия (7).

В моменты времени, когда это условие нарушается, можно записать:

$$0 = -x_a(\tau_{\text{СТ}}) + L + \frac{\rho c_p VR}{A'} \ln \theta_{\text{СТ}}(\tau_{\text{СТ}}). \quad (8)$$

Решение (8) дает значения моментов времени, в которых может происходить переход от термостатирования к его отсутствию, и наоборот, а весь процесс разбивается на соответствующие периоды. В зависимости от вида функции $T_{\text{ВХ}}(\tau)$ решение для моментов времени $\tau_{\text{СТ}i}$ может быть выражено в явном или в неявном виде с последующим осуществлением итеративного процесса для определения их значений. Таким образом, решения $\tau_{\text{СТ}i}$ получаются из уравнений

$$\varphi(\tau) = L + \frac{\rho c_p VR}{A'} \ln \theta_{ст}(\tau) = 0 \text{ при } 0 \leq \tau \leq \tau_H,$$

$$\varphi(\tau) = -x_a(\tau) + L + \frac{\rho c_p VR}{A'} \ln \theta_{ст}(\tau) = 0 \text{ при } \tau > \tau_H.$$

Если эти уравнения не имеют решений, то при непрерывности функции $\varphi(\tau)$ условие термостатирования выполняется в течение всего процесса. В противном случае получится ряд решений $\tau_{ст1} < \tau_{ст2} < \dots < \tau_{стn-1} < \tau_{стn}$, а нарушение термостатирования в момент времени $\tau_{ст1}$ будет при монотонно убывающей функции $\varphi(\tau)$ в окрестности $\tau_{ст1}$, что выполняется при условии $d\varphi(\tau)/d\tau > 0$.

Первая производная функции $\varphi(\tau)$ принимает вид:

$$\frac{d\varphi(\tau)}{d\tau} = \pm \frac{\rho c_p VR}{A' \ln \theta_{ст}(\tau)} \frac{\Delta T_{ст}}{|T_{вх}(\tau) - T_{ф}|} \frac{dT_{вх}}{d\tau} \text{ при } 0 \leq \tau \leq \tau_H,$$

$$\frac{d\varphi(\tau)}{d\tau} = -\frac{dx_a(\tau)}{d\tau} \pm \frac{\rho c_p VR}{A' \ln \theta_{ст}(\tau)} \frac{\Delta T_{ст}}{|T_{вх}(\tau) - T_{ф}|} \frac{dT_{вх}}{d\tau} \text{ при } \tau > \tau_H.$$

Здесь знак «+» при $T_{вх} > T_{ф}$, знак «-» при $T_{вх} < T_{ф}$,

$$\frac{dx_a(\tau)}{d\tau} = \frac{c_p \rho V}{m_0 Q_{ф}} |T_{вх}(\tau) - T_{ф}|.$$

При условии $d\varphi(\tau)/d\tau = 0$ для $\tau = \tau_{ст1}$, т. е. при наличии точки перегиба термостатирование нарушается. Если точки перегиба нет, то имеет место термостатирование и для дальнейшего анализа необходимо переходить к изучению поведения функции $\varphi(\tau)$ в следующих ее нулях: при $\tau_{ст2}$, $\tau_{ст3}$ и т. д.

Для $T_{вх} = \text{const}$ ($\theta_{ст} = \text{const}$) решение может быть представлено в виде достаточно простых соотношений. При постоянстве параметров аккумулятора по его длине и при $T_{вх} = \text{const}$ и $R = R_f + R_w + R_{ф} \approx \text{const}$ температура теплоносителя на выходе из АФП в начальной стадии процесса остается постоянной и условием термостатирования теплоносителя будет выполнение (7) в начальный момент времени. Нарушение этого условия произойдет только в конечной стадии процесса, а именно при $x_a > 0$.

В соответствии с (3), (2) и (8) для $T_{вх} = \text{const}$ можно записать:

$$\tau_H = \frac{\rho L A_f (1 - \varepsilon) Q_{ф} R}{|T_{вх} - T_{ф}| A'}, \quad (9)$$

$$x_a(\tau) = \frac{c_p \rho V}{m_0 Q_\Phi} |T_{\text{вх}} - T_\Phi| (\tau - \tau_H), \quad (10)$$

$$x_a(\tau_{\text{ст}}) = L + \frac{\rho c_p V R}{A'} \ln \theta_{\text{ст}}. \quad (11)$$

С подстановкой в (11) x_a из (10) получается выражение для времени окончания периода с термостатированием:

$$\tau_{\text{ст}} = \tau_H + \frac{m_0 Q_\Phi L}{c_p \rho V |T_{\text{вх}} - T_\Phi|} + \frac{m_0 Q_\Phi R}{A' |T_{\text{вх}} - T_\Phi|} \ln \theta_{\text{ст}}.$$

При этом должно быть обеспечено выполнение условия (7), так как в противном случае удовлетворить исходному неравенству (4) невозможно.

Остаток массы в конце периода с термостатированием (в конечной стадии) [15]:

$$M(\tau_{\text{ст}}) = M_0 + \frac{c_p \rho V}{Q_\Phi} \left(\exp \left(-\frac{A' L}{c_p \rho V R} \right) - \exp \left(\frac{A' x_a(\tau_{\text{ст}})}{c_p \rho V R} \right) \right) \int_0^{\tau_{\text{ст}}} |T_{\text{вх}}(\tau) - T_\Phi| f(\tau) d\tau,$$

где

$$f(\tau) = \exp \left(\frac{A'}{m_0 Q_\Phi R} \int_{\tau_H}^{\tau} |T_{\text{вх}}(\tau) - T_\Phi| d\tau \right).$$

Соответственно, доля этого остатка по отношению к исходной массе ФПМ определяется соотношением $\Delta M(\tau_{\text{ст}}) = M(\tau_{\text{ст}}) / M_0$.

При $T_{\text{вх}} = \text{const}$ остаток массы выражается соотношением

$$M(\tau_{\text{ст}}) = M_0 - \frac{c_p \rho V m_0 R}{A'} \times \exp \left(-\frac{A'}{m_0 Q_\Phi R} |T_{\text{вх}} - T_\Phi| (\tau_{\text{ст}} - \tau_H) \right) \left(\exp \left(-\frac{A' L}{c_p \rho V R} \right) - \exp \left(\frac{A' x_a(\tau_{\text{ст}})}{c_p \rho V R} \right) \right).$$

Применение полученных формул к АФП с конкретной конфигурацией поверхностей теплообмена предполагает вывод соотношений для вычисления величин ε , A , A_{ak} , V_{ak} и R в соответствии с геометрическими параметрами АФП. Конкретный вид термических сопротивлений и других необходимых параметров, а также способов их вывода можно найти в [17], для случаев плоского слоя ФПМ, обтекаемого теплоносителем, — в [18], цилиндрического слоя, обтекаемого изнутри, — в [19], обтекаемого снаружи — в [20], для АФП со сферическими капсулами — в [21].

В соответствии с этими соотношениями для АФП конкретного типа и выведенными формулами может быть определен момент времени, начиная с которого отклонение от требуемой температуры на выходе превысит допустимое значение, а также какое количество исходной фазы на данный момент останется. Уменьшить этот остаток можно, создав большую интенсивность теплопереноса между теплоносителем и ФПМ за счет изменения конструктивных параметров.

Для обеспечения термостатированного потока теплоносителя в продолжение всего процесса фазового перехода необходимо обеспечить дополнительные нагрев с использованием нагревателя в режиме зарядки и охлаждение с использованием холодильной установки в режиме разрядки аккумулятора.

При большом отклонении от значений параметров, при которых выполняются выведенные формулы, т. е. при нарушении условия $R_{\phi}/R \approx 0$, возникает необходимость применения более точных методов с осуществлением вариантных расчетов.

Выводы. Принятая математическая модель позволяет получить расчетные формулы для определения времени функционирования АФП с обеспечением термостатирования потока теплоносителя.

Получено выражение для расчета остатка массы исходной фазы (твердой или жидкой), когда дальнейшая зарядка или разрядка АФП происходит без термостатирования потока теплоносителя на выходе.

Представленные зависимости пригодны для выполнения расчетов в случае изменяющейся во времени температуры на входе в проточный АФП любого типа.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Грилихес В.А., Матвеев В.М., Полуэктов В.П. Солнечные высокотемпературные источники тепла для космических аппаратов. М., Машиностроение, 1975.
- [2] Бекман Г., Гилли П. Тепловое аккумулирование энергии. М., Мир, 1987.
- [3] Левенберг В.Д., Ткач К.М., Гольстром В.А. Аккумулирование тепла. Киев, Техника, 1991.
- [4] Kuravi S., Trahan J., Goswami D.Y., et al. Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 2013, vol. 39, iss. 4, pp. 285–319. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2013.02.001>
- [5] Умеренков Е.В. Разработка аккумуляторов теплоты на фазовом переходе для систем теплоснабжения. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Курск, ЮЗГУ, 2012.
- [6] Миуи Дзосэн К.К. Теплоаккумулирующий сосуд. Патент JPS 5736519B2. Заявл. 19.04.1976, опубл. 04.08.1982.

- [7] Saito A., Saito A., Utaka Y., et al. Basic research on a latent heat thermal energy storage by direct contact melting and solidification. 1st Report: Visual experiments of direct contact solidification process in paraffin. *Trans. JSRAE*, 1986, vol. 3, no. 1, pp. 43–50. DOI: <https://doi.org/10.11322/tjsrae.3.43>
- [8] Saito A., Saito A., Utaka Y., et al. Basic research on a latent heat thermal energy storage by direct contact melting and solidification. 2nd Report: Heat transfer characteristics of direct contact solidification of n-Eicosane as PCM. *Trans. JSRAE*, 1983, vol. 3, no. 1, pp. 51–60. DOI: <https://doi.org/10.11322/tjsrae.3.51>
- [9] Gerhard V. Warmespeicher. Patent DE 3010849. Appl. 21.03.1980, publ. 15.10.1981.
- [10] Mehling H. Latent heat storage with PCM-graphite composite material: experimental results from the first test store and potential application field. *IEA, ECES IA Annex 10, Phase Change Materials and Chemical Reactions for Thermal Energy Storage. 6th Workshop*, 2000. 9 p.
- [11] Saito A., Saito A., Katayama K. Basic research on a thermal energy reservoir containing latent heat tes cylindrical capsules. *Trans. JSRAE*, 1986, vol. 3, no. 1, pp. 35–42. DOI: <https://doi.org/10.11322/tjsrae.3.35>
- [12] Domanski R. Experimental and theoretical investigation of spiral PCM thermal energy storage. *Unit IEA, ECES IA Annex 10, Phase Change Materials and Chemical Reactions for Thermal Energy Storage. 2nd Workshop*, 1998. 8 p.
- [13] Hiroshi I. Operation records of encapsuled heat storage system. *IEA, ECES IA Annex 10, Phase Change Materials and Chemical Reactions for Thermal Energy Storage. 2nd Workshop*, 1998. 14 p.
- [14] Arkar C., Medved S. Enhanced solar assisted building ventilation system using sphere encapsulated PCM thermal heat storage. *IEA, ECES IA Annex 17, Advanced Thermal Energy Storage Techniques — Feasibility Studies and Demonstration Projects. 2nd Workshop*, 2002. 9 p.
- [15] Россихин Н.А. Система уравнений теплообмена и изменения массы фазы в проточных аккумуляторах теплоты фазового перехода. *Аэрокосмический научный журнал*, 2017, № 3, с. 39–52.
- [16] Rossikhin N.A. General analytical solution of the heat transfer problem in flow heat accumulators on phase transitions. *Sciences of Europe*, 2019, vol. 44, no. 1, pp. 48–59. EDN: UQOTFN
- [17] Россихин Н.А., Чукаев А.Г., Макаренков Д.А. К вопросу о расчете капсульного аккумулятора теплоты по аналитическим зависимостям. *Естественные и технические науки*, 2016, № 8, с. 82–84. EDN: WXOUVJ
- [18] Россихин Н.А., Чукаев А.Г. Затвердевание ограниченного плоского слоя материала, омываемого теплоносителем. *Естественные и технические науки*, 2015, № 11, с. 482–484. EDN: VHTLUV
- [19] Россихин Н.А., Чукаев А.Г. Затвердевание цилиндрического слоя материала, омываемого изнутри теплоносителем. *Естественные и технические науки*, 2016, № 2, с. 87–89. EDN: VVWQNV

[20] Россихин Н.А., Чукаев А.Г. Затвердевание цилиндрического слоя материала, омываемого снаружи теплоносителем. *Естественные и технические науки*, 2016, № 2, с. 90–92. EDN: VWVQOF

[21] Rossikhin N. Heat transfer equations in flow-through phase transition heat accumulators with different heat exchange surfaces. *Sciences of Europe*, 2023, no. 127, pp. 119–128. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10039452>

Россихин Николай Алексеевич — старший преподаватель кафедры «Теплофизика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Чукаев Алексей Георгиевич — д-р техн. наук, старший научный сотрудник отдела нелинейной волновой механики ИМАШ РАН НЦ НВМТ (Российская Федерация, 119334, Москва, ул. Бардина, д. 4).

Макаренков Дмитрий Анатольевич — д-р техн. наук, заместитель директора по науке НИЦ КИ — ИРЕА (Российская Федерация, 107076, Москва, ул. Богородский Вал, д. 3).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Россихин Н.А., Чукаев А.Г., Макаренков Д.А. Условие термостатирования в проточных аккумуляторах теплоты фазового перехода. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2024, № 2 (113), с. 74–87. EDN: KWUFJW

**CONDITION FOR MAINTAINING CONSTANT TEMPERATURE
IN THE PHASE TRANSITION HEAT FLOW ACCUMULATORS**

N.A. Rossikhin¹

rossn@bmstu.ru

A.G. Chukaev²

chukaev43@mail.ru

D.A. Makarenkov³

makarenrovd@mail.ru

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

² Mechanical Engineering Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

³ National Research Center “Kurchatov Institute” — IREA, Moscow, Russian Federation

Abstract

Maintaining the coolant constant temperature at the outlet in the phase transition heat flow accumulators, close to the phase transition temperature, is ensured by sufficiently intense heat exchange between the coolant and the phase transition surface. At the same time, the coolant temperature deviation at the outlet

Keywords

Heat accumulator, solidification, melting, phase transition, solid phase

less than the permissible value could not always be provided during the entire phase transition period. For the constant cross-section accumulators with constant thermal characteristics along the length, an analytical solution was obtained making it possible to calculate the point in time, starting from which the coolant temperature deviation at the outlet from the phase transition temperature became higher than the permissible value. It could be applicable in calculating many phase transition heat flow accumulators (shell and tube, capsule, etc.) that use complex configuration of the heat exchange surfaces. To derive it, an analytical quasi-stationary solution was used corresponding to an ideal case, when thermal resistance in the phase-transition material was low. In this case, the process sufficiently high intensity was ensured by selecting the appropriate design parameters at the design stage. The resulting analytical solution describes the charging and discharging processes in accumulators with different configurations of the heat exchange surfaces and appears general in describing processes in the flow heat accumulators

Received 24.04.2023

Accepted 30.10.2023

© Author(s), 2024

REFERENCES

- [1] Grilikhes V.A., Matveev V.M., Poluektov V.P. Solnechnye vysokotemperaturnye istochniki tepla dlya kosmicheskikh apparatov [Solar high-temperature heat sources for space vehicles]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975.
- [2] Beckmann G., Gilli P.V. Thermal energy storage. Springer, 1984.
- [3] Levenberg V.D., Tkach K.M., Golstrem V.A. Akkumulirovanie tepla [Heat accumulation]. Kiev, Tekhnika Publ., 1991.
- [4] Kuravi S., Trahan J., Goswami D.Y., et al. Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 2013, vol. 39, iss. 4, pp. 285–319. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2013.02.001>
- [5] Umerenkov E.V. Razrabotka akkumulyatorov teploty na fazovom perekhode dlya sistem teplosnabzheniya. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk [Development of phase transition heat accumulators for heat supply systems. Abs. Cand. Sc. (Eng.) Diss.]. Kursk, YuZSU, 2012 (in Russ.).
- [6] Miui Dzosen K.K. Teploakkumuliruyushchiy sosud [Heat storage vessel]. Patent JPS 5736519B2. Appl. 19.04.1976, publ. 04.08.1982.
- [7] Saito A., Saito A., Utaka Y., et al. Basic research on a latent heat thermal energy storage by direct contact melting and solidification. 1st Report: Visual experiments of direct contact solidification process in paraffin. *Trans. JSRAE*, 1986, vol. 3, no. 1, pp. 43–50. DOI: <https://doi.org/10.11322/tjsrae.3.43>

- [8] Saito A., Saito A., Utaka Y., et al. Basic research on a latent heat thermal energy storage by direct contact melting and solidification. 2nd Report: Heat transfer characteristics of direct contact solidification of n-Eicosane as PCM. *Trans. JSRAE*, 1983, vol. 3, no. 1, pp. 51–60. DOI: <https://doi.org/10.11322/tjsrae.3.51>
- [9] Gerhard V. Warmespeicher. Patent DE 3010849. Appl. 21.03.1980, publ. 15.10.1981.
- [10] Mehling H. Latent heat storage with PCM-graphite composite material: experimental results from the first test store and potential application field. *IEA, ECES IA Annex 10, Phase Change Materials and Chemical Reactions for Thermal Energy Storage. 6th Workshop*, 2000. 9 p.
- [11] Saito A., Saito A., Katayama K. Basic research on a thermal energy reservoir containing latent heat tes cylindrical capsules. *Trans. JSRAE*, 1986, vol. 3, no. 1, pp. 35–42. DOI: <https://doi.org/10.11322/tjsrae.3.35>
- [12] Domanski R. Experimental and theoretical investigation of spiral PCM thermal energy storage. *Unit IEA, ECES IA Annex 10, Phase Change Materials and Chemical Reactions for Thermal Energy Storage. 2nd Workshop*, 1998. 8 p.
- [13] Hiroshi I. Operation records of encapsuled heat storage system. *IEA, ECES IA Annex 10, Phase Change Materials and Chemical Reactions for Thermal Energy Storage. 2nd Workshop*, 1998. 14 p.
- [14] Arkar C., Medved S. Enhanced solar assisted building ventilation system using sphere encapsulated PCM thermal heat storage. *IEA, ECES IA Annex 17, Advanced Thermal Energy Storage Techniques — Feasibility Studies and Demonstration Projects. 2nd Workshop*, 2002. 9 p.
- [15] Rossikhin N.A. A system of equations of heat transfer and changing phase mass in phase transition heat accumulators. *Aerokosmicheskiy nauchnyy zhurnal [Aerospace Scientific Journal]*, 2017, no. 3, pp. 39–52 (in Russ.).
- [16] Rossikhin N.A. General analytical solution of the heat transfer problem in flow heat accumulators on phase transitions. *Sciences of Europe*, 2019, vol. 44, no. 1, pp. 48–59. EDN: UQOTFN
- [17] Rossikhin N.A., Chukaev A.G., Makarenkov D.A. On problem of calculating capsule heat accumulator by analytical dependence. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki [Natural and Technical Sciences]*, 2016, no. 8, pp. 82–84 (in Russ.). EDN: WXOUVJ
- [18] Rossikhin N.A., Chukaev A.G. Solidification of a limited flat layer of material washed by a heat carrier. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki [Natural and Technical Sciences]*, 2015, no. 11, pp. 482–484 (in Russ.). EDN: VHTLUV
- [19] Rossikhin N.A., Chukaev A.G. Solidification of a cylindrical layer of material washed from inside by a coolant. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki [Natural and Technical Sciences]*, 2016, no. 2, pp. 87–89 (in Russ.). EDN: VWVQNV
- [20] Rossikhin N.A., Chukaev A.G. Solidification of a cylindrical layer of material washed from outside by a coolant. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki [Natural and Technical Sciences]*, 2016, no. 2, pp. 90–92 (in Russ.). EDN: VWVQOF
- [21] Rossikhin N. Heat transfer equations in flow-through phase transition heat accumulators with different heat exchange surfaces. *Sciences of Europe*, 2023, no. 127, pp. 119–128. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10039452>

Rossikhin N.A. — Assist. Lecturer, Department of Thermophysics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Chukaev A.G. — Dr. Sc. (Eng.), Senior Researcher, Department of Nonlinear Wave Mechanics, Mechanical Engineering Research Institute, Russian Academy of Sciences (Bardina ul. 4, Moscow, 119334 Russian Federation).

Makarenkov D.A. — Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Deputy Director for Science, National Research Center “Kurchatov Institute” — IREA (Bogorodskiy Val ul. 3, Moscow, 107076 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Rossikhin N.A., Chukaev A.G., Makarenkov D.A. Condition for maintaining constant temperature in the phase transition heat flow accumulators. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2024, no. 2 (113), pp. 74–87 (in Russ.). EDN: KWUFJW