

УДК 536.24

Расчет теплообмена и изменения соотношения фаз в протяженных проточных аккумуляторах теплоты с прямоугольными вставками

Зорина И. Г.^{1,*}, Россихин Н. А.¹,
Чукаев А. Г.²

[*zorina.ig@gmail.com](mailto:zorina.ig@gmail.com)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

²Филиал института машиноведения им. А. А. Благонравова
Российской академии наук «Научный центр нелинейной
волновой механики и технологии», Москва, Россия

В статье приведены аналитические зависимости позволяющие рассчитывать характеристики теплообмена в процессе зарядки и разрядки аккумуляторов фазового перехода капсульного типа с поперечными вставками основе веществ, изменяющих агрегатное состояние. Температура теплоносителя, движущегося в пространстве между теплоаккумулирующими элементами, может существенно изменяться по длине аккумулятора. Показана возможность использования аналитических зависимостей, полученных для расчета параметров в капсульном аккумуляторе фазового перехода, применительно к АФП со вставками

Ключевые слова: аккумулятор теплоты, зарядка, разрядка, фазовый переход, жидкая фаза, твердая фаза

Использование возобновляемых видов энергии, таких как солнечная, ветровая, биогаз и другие, осложняется неравномерностью их поступления. Поэтому аккумулирование энергии делает потребителя независимым от непостоянства работы источника энергии.

К настоящему времени накоплен более чем сорокалетний опыт разработки специальных устройств – аккумуляторов тепловой энергии для различных систем теплоснабжения на основе теплоаккумулирующих материалов, изменяющих свое агрегатное состояние в процессе накопления и отдачи тепловой энергии. Они более компактны, обеспечивают высокую плотность запасаемой энергии в сравнении с жидкостными или гравийными тепловыми аккумуляторами.

При рабочих температурах до 120°C в качестве теплоаккумулирующего материала (ТАМ) применяют кристаллогидриды неорганических солей. В [1] исследовалась пригодность кристаллогидрата гидроксида натрия для целей тепловой аккумуляции. Основным их недостатком является невысокая теплота плавления, а также повышенная коррозионная активность. Применение для этой цели органических веществ (парафинов, восков) снимает проблемы коррозионного разрушения корпуса, обеспечивает высокие плотности запа-

саемой энергии в диапазоне температур 40-100°C, но сопряжено и с их недостатками: малой теплопроводностью, невысокими значениями теплоты фазового перехода.

Для интенсификации теплообмена в таких устройствах применяются высокотеплопроводные металлические инклюзивы различной формы, капсульная закладка [2-5] (рис. 1 а) или размещение теплоаккумулирующих материалов в виде вставок [6, 7] (рис. 1 б), оребренные поверхности и т.д.

В обзоре [8] отражены основные типы аккумуляторов теплоты фазового перехода (АФП) с проточным теплоносителем применительно к гелиоустановкам. Особенности их конструкции в большой степени связаны с необходимостью улучшения теплопереноса между теплоносителем и ТАМ. Типы АФП с использованием различных способов интенсификации теплообмена рассмотрены в [9]. Существенной особенностью проточных аккумуляторов является

Отмеченные усложнения конструкций приводят к дополнительным трудностям при их расчете. Для упрощения проведения расчетов при разработке АФП возможно применение смешанных методов, в которых в аналитических зависимостях используются коэффициенты, полученные численно или экспериментально [10, 11]. В данной работе формулы, полученные в [10, 11] для расчета параметров протяженных капсульных АФП, применяются для аккумуляторов со вставками с ТАМ (рис. 1 б). При этом используются критериальные уравнения теплообмена, полученные на основе экспериментальных и численных исследований теплообмена в коротких аккумуляторах [6, 7]. Этот подход был представлен на конференции в Ашхабаде [12].

Таким образом, рассматриваются проточные АФП, имеющие регулярную (повторяющуюся) структуру (рис. 1).

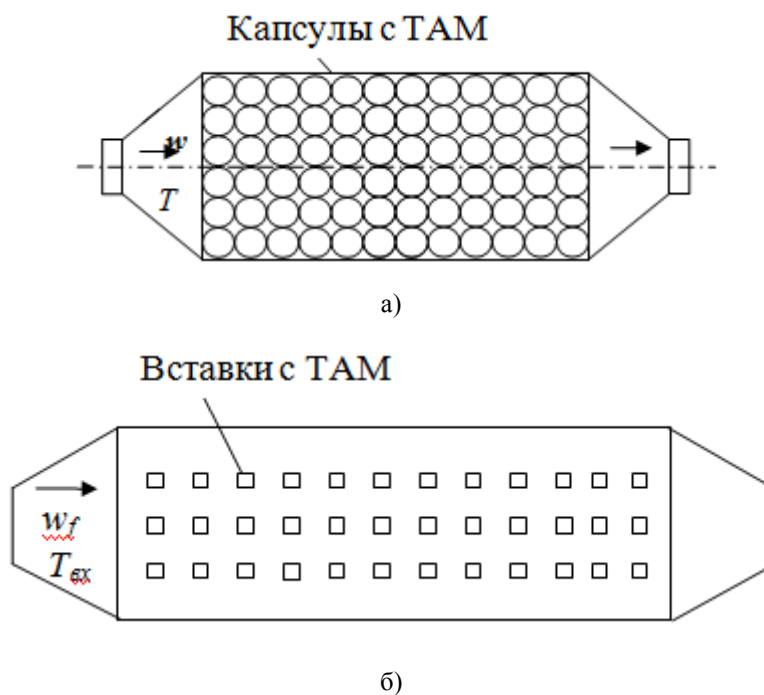


Рис.1. Схемы проточных АФП с регулярной структурой расположения ТАЭ: а) капсульный АФП; б) АФП с прямоугольными вставками

АФП характеризуется следующими геометрическими размерами:

δ_k – толщина оболочки ТАЭ; A_k – площадь ТАЭ; V_k – объем ТАЭ; D – диаметр капсул в случае капсульного АФП; $a \times b$ – размеры прямоугольной вставки (рис. 2). Известны также: L_x – шаг между вставками в направлении потока теплоносителя; L_y – шаг между вставками в поперечном по отношению к потоку теплоносителя направлении; ε – пористость при заполнении пространства ТАЭ; A_f – площадь поперечного сечения проточной части АФП; L – длина АФП (рис. 3).

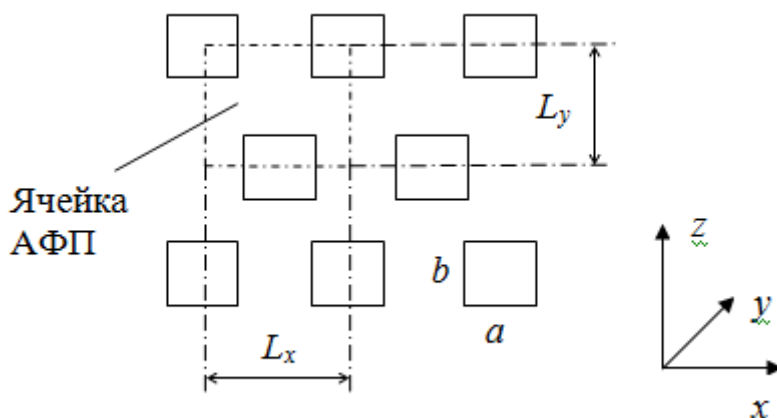


Рис. 2. Ячейка АФП со вставками, заполненными ТАМ

Для математической постановки задачи и вывода аналитических зависимостей, описывающих теплообмен и фазовый переход в протяженном АФП, в [7, 8] были использованы упрощающие допущения. Основными из них являются следующие: теплообмен в потоке теплоносителя одномерный ($T(x, y, z, \tau) = T(x, \tau)$); теплофизические свойства ТАМ и теплоносителя постоянны; теплообмен в АФП квазистационарный. Здесь x – координата на оси, направленной вдоль потока теплоносителя, τ – время.

Точкой a обозначим координату плоскости, разделяющей область АФП на две подобласти – с закончившимся фазовым переходом ($x < x_a$) и той, в которой процесс фазового перехода продолжается ($x > x_a$). При этом начальная стадия характеризуется выполнением условия $x_a = 0$, а конечная – $x_a > 0$.

Участок с продолжающимся фазовым переходом $[x_a, L]$ имеет длину

$L_a = L - x_a$ (рис. 3). В конечной стадии процессов зарядки и разрядки величина L_a постепенно уменьшается до нуля.

Полученные в [10, 11] аналитические решения позволяют рассчитать среднюю по поперечному сечению температуру теплоносителя $T(x, \tau)$ (рис. 3) и удельную по длине АФП массу оставшейся после фазового перехода за время τ части ТАМ $m(x, \tau)$. По определению она равна изменению массы фазы, отнесенной к единице длины аккумулятора:

$$m(x, \tau) = \frac{dM}{dx},$$

где dM – масса фазы в объеме АФП на длине dx между двумя поперечными сечениями в момент времени τ (рис. 3).

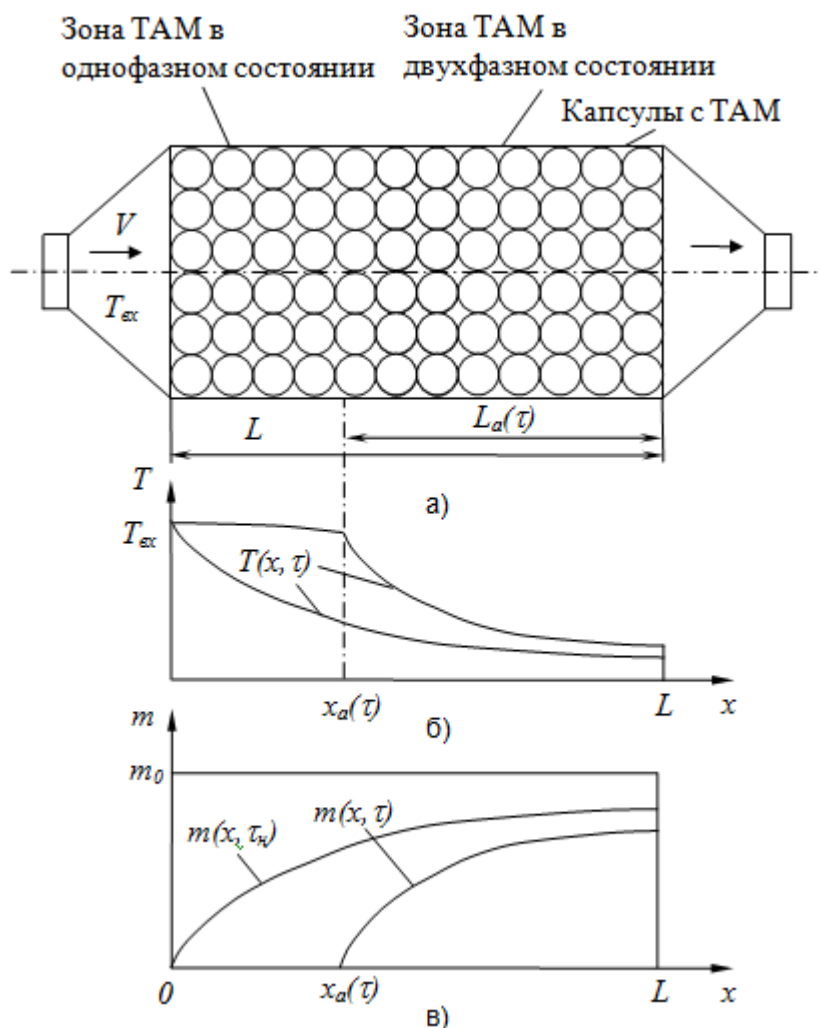


Рис. 3. Распределение температуры теплоносителя и удельной массы не расплавившегося ТАМ в проточном АФП

Понятие удельной массы на единицу длины АФП было введено в [10] для удобства анализа изменения соотношения фаз в процессах, происходящих в АФП. В [12] предложено обобщение этого понятия на трехмерный случай (вводится в рассмотрение плотность фазы в объеме АФП) и выведено дифференциальное уравнение ее изменения.

Температура теплоносителя на входе в аккумулятор определяется графиком тепловой нагрузки источника при зарядке или условиями потребления запасенной энергии в процессе разрядки:

$$T(0, \tau) = T_{ex}(\tau). \quad (1)$$

Считаем, что эта температура изменяется достаточно медленно и распределение температуры теплоносителя соответствует стационарному решению. В начале процесса АФП является полностью заряженным или разряженным, что выражается условиями

$$m(x,0) = m_0 = const,$$

$$m_0 = \rho_L A_f \left(1 - \varepsilon - \frac{A_\kappa \delta_\kappa}{V_\kappa} \right). \quad (2)$$

Здесь ρ_L [кг/м³] – плотность жидкой фазы. Считаем, что плотность жидкой фазы ТАМ меньше, чем твердой, и в начале процесса расплав занимает весь ТАЭ, в последующем уменьшаясь в объеме. Объемный расход V через АФП считается постоянным.

Аналитические соотношения, полученные в [10, 11], выглядят следующим образом.

Время окончания начальной стадии зарядки или разрядки равно времени τ_n полного расплавления (или затвердевания) ТАМ при $x=0$ и определяется из условия $m(0, \tau_n)=0$:

$$\left| \int_0^{\tau_n} T_{\text{вх}}(\tau) d\tau - T_\phi \tau_n \right| = \frac{\rho_L A_f (1 - \varepsilon) Q_\phi R}{A'}. \quad (3)$$

Здесь использование конкретной зависимости $\int_0^{\tau_n} T_{\text{вх}}(\tau) d\tau$ приводит к уравнению, левая часть которого представляет функцию от τ_n . При этом полученное уравнение не всегда может быть решено относительно τ_n . В этом случае для получения числового значения необходимо применять приближенные методы, например, метод последовательных приближений.

Положение точки x_a , разделяющей области АФП:

$$x_a(\tau) = \frac{c \cdot p \cdot \rho \cdot V}{m_0 Q_\phi} \int_{\tau_n}^{\tau} \left| T_{\text{вх}}(\tau) - T_\phi \right| d\tau. \quad (4)$$

$$T(x, \tau) = T_\phi + \left(T_{\text{вх}}(\tau) - T_\phi \right) e^{-\frac{A'(x - x_a(\tau))}{\rho c p V R}}. \quad (5)$$

При этом $x_a \leq x \leq L$, $x \geq x_a(\tau)$.

Выражение для удельной на единицу длины аккумулятора массы неизрасходованного ТАМ для всего периода зарядки или разрядки АФП в начальной и конечной стадиях: имеет вид

$$m(x, \tau) = m_0 - \frac{A'}{Q_\phi R} \cdot e^{-\frac{A'x}{c \cdot p \cdot \rho \cdot V \cdot R}} \cdot \int_0^{\tau} \left| T_{\text{вх}}(\tau) - T_\phi \right| \cdot f(\tau) d\tau, \quad (6)$$

где при $0 \leq x \leq \tau_n$

$$f(\tau) = 1,$$

при $\tau_n \leq x \leq \tau_n$

$$f(\tau) = e^{-\frac{A'}{m_0 Q_\phi R} \int_{\tau_n}^{\tau} |T_{\text{вх}}(\tau) - T_\phi| d\tau}. \quad (7)$$

Полная зарядка или разрядка происходит за время τ_n , определяемое из условия $L = x_a(\tau_n)$:

$$\int_{\tau_n}^{\tau_n} |T_{\text{вх}}(\tau) - T_\phi| d\tau = \frac{m_0 Q_\phi R}{A'} L. \quad (8)$$

Остаток массы фазы в АФП равен

$$M(\tau) = \int_{x_a}^L m(x, \tau) dx.$$

С учетом (6) получается выражение

$$M(\tau) = M_0 + \frac{c_p \cdot \rho \cdot V}{Q_\phi A'} \cdot \left(e^{-\frac{A'L}{c_p \cdot \rho \cdot V \cdot R}} - e^{-\frac{A'x_a}{c_p \cdot \rho \cdot V \cdot R}} \right) \times \int_0^{\tau} |T_{\text{вх}}(\tau) - T_\phi| \cdot f(\tau) d\tau. \quad (9)$$

Теплота фазового перехода в АФП на единицу его длины и вся теплота, затрачиваемая на фазовый переход за время τ , равны

$$Q_l(x, \tau) = Q_\phi \cdot (m_0 - m(x, \tau)). \quad (10)$$

$$Q(\tau) = \int_{x_a}^L Q_l(x, \tau) dx = Q_\phi \cdot (M_0 - M(\tau)). \quad (11)$$

В представленных здесь формулах используется R [$\text{м}^2\text{К}/\text{Вт}$] – общее термическое сопротивление между потоком теплоносителя и поверхностью фазового перехода ТАМ по потоку теплоты, отнесенному к площади внешней поверхности капсул $A(x)$, которое определяется соотношением:

$$\frac{Q}{A(x)} = \frac{T(x, \tau) - T_\phi}{R},$$

где Q [Вт] – тепловой поток от теплоносителя к поверхности фазового перехода;

$A(x) [м^2]$ – общая площадь внешней поверхности всех ТАЭ в АФП от входа до поперечного сечения с координатой x .

При неизменных площади поперечного сечения A_f , пористости ε и диаметров шаров D или при одинаковых параметрах ячеек в АФП со вставками величина $A(x)$ пропорциональна x , то есть $A(x)=bx$ при $b=A'=const$, где A' – производная функции $A(x)$.

Соотношения (1)–(11) позволяют рассчитать временные зависимости параметров АФП при зарядке и разрядке в течение всего периода.

Следует отметить, что два рассматриваемых типа аккумуляторов (рис. 1) отличаются геометрическими параметрами, что отражается в записи некоторых коэффициентов. Отметим эти отличия.

Для капсульного АФП в случае сферических капсул диаметра D выполняется соотношение

$$A(x)=6A_f(1-\varepsilon)x/D.$$

В АФП со вставками получаются следующие соотношения.

Пористость равна

$$\varepsilon = 1 - \frac{ab}{L_x L_y}.$$

Площадь поверхности ТАЭ от входа АФП до сечения с координатой x есть

$$A(x) = \frac{2(a+b)}{L_x L_y} A_f x,$$

ее производная по x –

$$A' = \frac{2(a+b)}{L_x L_y} A_f.$$

Нарушение пропорций ячеек возле корпуса АФП не учитывается. Соотношения верны для коридорного и шахматного расположения вставок.

Общее термическое сопротивление R складывается из трех составляющих:

$$R = R_f + R_w + R_{TAM},$$

где $R_f = 1/\alpha_f$ – термическое сопротивление между потоком теплоносителя и поверхностью капсул, α_f – коэффициент теплоотдачи;

R_w – термическое сопротивление оболочки капсулы;

R_{TAM} – термическое сопротивление между внутренней поверхностью капсулы и поверхностью фазового перехода в ТАМ.

Для АФП со сферическими капсулами коэффициент α_f определяется с использованием известных критериальных зависимостей теплообмена для засыпки сфер.

Термическое сопротивление $R_f = 1/\alpha_f$ при постоянных параметрах АФП постоянно, в то время как R_{TAM} изменяется в процессе фазового перехода. Зависимости (3)–(11) можно применять в случае $R \approx const$, то есть при $R_{TAM} \ll R$. В предельном выражении должно выполняться условие

$$\frac{R_{TAM}}{R} \rightarrow 0.$$

При этом, поскольку термическое сопротивление внутри капсулы с течением времени растет до бесконечности, то возникает необходимость ограничить рассмотрение процесса до достижения границы раздела фаз некоторого предельного среднего радиуса, и использовать среднее термическое сопротивление в этом временном интервале. Оставшаяся неучтенная масса фазы внутри этого предельного радиуса определит некоторую погрешность расчета, однако она убывает очень быстро – пропорционально кубу радиуса, что дает возможность обеспечить приемлемую точность.

Как уже отмечалось, теплообмен в ячейке АФП со вставками квадратного сечения был исследован численно и экспериментально в работах [6, 7]. В них для разных режимов были определены величины коэффициентов теплопередачи k от теплоносителя к ТАМ и построены критериальные зависимости, с помощью которых может быть определено общее термическое сопротивление в пределах ячейки как $R=1/k$.

Соответственно этому, в [6] рассматривалась задача нестационарного сопряженного теплообмена при полностью развитом ламинарном движении теплоносителя в компактных АФП со вставками. Была поставлена модифицированная задача Стефана, включающая уравнения энергии и уравнения Навье-Стокса и неразрывности для теплоносителя и ТАМ. При этом в уравнении энергии для ТАМ в качестве переменной использовалась энтальпия для возможности учета фазового перехода. При численном исследовании применялся метод энтальпии решения задач стефановского типа.

Кроме этого, была проведена серия экспериментов с АФП с поперечным обтеканием вставок с ТАМ, которые размещались в полиэтиленовых контейнерах, заполненных кристаллогидратом гидроксида натрия. Температура воздуха на входе равнялась 75°C и 85°C , расход $2,5 \times 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ и $3,0 \times 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$.

Цикл зарядки считался завершенным при полном расплавлении ТАМ. При разрядке АФП эксперимент завершался при температуре ТАМ, равной температуре окружающей среды. Замеры температуры и расхода проводились каждые 10 минут. Общее время эксперимента составляло от 4,5 до 6 часов.

Полученные результаты были использованы для записи критериальных уравнений нестационарного сопряженного конвективного теплообмена в ячейке (рис. 2) [6, 7]. Здесь приводятся уточненные уравнения для случая поперечного расположения вставок с ТАМ:

для режима зарядки –

$$Nu_k = 6,5 \cdot 10^{-4} Re^{1,5} Pr^{1/3} \cdot (Fo \cdot Ste)^{-0,415}; \quad (12)$$

для режима разрядки –

$$Nu_k = 2,48 \cdot 10^{-5} Re^{1,5} Pr^{1/3} \cdot (Fo \cdot Ste)^{-3,04}. \quad (13)$$

Эти соотношения выполняются в следующих диапазонах критериальных чисел: $3 \leq Re \leq 900$. Интервал безразмерного времени $t = Fo \cdot Ste$ для режима зарядки: $0,03 \leq t \leq 0,1$, а для разрядки $0,55 \leq t \leq 1$. Критериальные уравнения (12), (13) отражают полный цикл за-

рядки и разрядки АФП с прогревом, плавлением, остыванием жидкой фазы и затвердеванием ТАМ.

Индекс k означает, что критерии построены с использованием коэффициента теплопередачи, а не теплоотдачи.

Здесь $T_{я}$ – температура на входе в ячейку;

$$Re = \frac{w_f L_{\Gamma}}{\nu}; Pr = \frac{\nu}{a}; Fo = \frac{a\tau}{L_{\Gamma}^2}; Ste = \frac{c_p |T_{я} - T_{\phi}|}{Q_{\phi}}; Nu_k = \frac{kL_{\Gamma}}{\lambda}.$$

Характерный размер определяет выражение

$$L_{\Gamma} = \frac{2(L_x L_y - ab)}{a + b}.$$

Скорость на входе в ячейку определяется по объемному расходу через АФП формулой

$$w_{я} = \frac{V}{A_f \left(1 - \frac{b}{2L_y}\right)}.$$

Как отмечалось, при выводе формул (1)–(11) предполагалось постоянство коэффициентов, в том числе постоянство термического сопротивления R , которое на самом деле изменяется с течением времени. Оценим, насколько оно выполняется в АФП с прямоугольными вставками для области параметров, определяемых критериальными уравнениями (12), (13). Если поделить их левые и правые части уравнений друг на друга, то можно получить:

для режима зарядки –

$$\frac{k_{max}}{k_{min}} = \left(\frac{\max(Fo \cdot Ste)}{\min(Fo \cdot Ste)} \right)^{0,415} = 3,3^{0,415} = 1,64; \quad (14)$$

для режима разрядки –

$$\frac{k_{max}}{k_{min}} = \left(\frac{\max(Fo \cdot Ste)}{\min(Fo \cdot Ste)} \right)^{3,04} = 1,82^{3,04} = 6,16. \quad (15)$$

Из соотношений (14)–(15) видно, что для режима зарядки при использовании среднего в процессе термического сопротивления $R = (R_{min} + R_{max})/2$ получается погрешность ~ 30%. Для режима разрядки формулы (1)–(11) использовать нельзя, так как не выполняется условие $R \approx const$. В этом случае нужно учитывать изменение термического сопротивления внутри вставки с течением времени и рассчитывать процесс численно или по уточненным аналитическим решениям.

Выводы

1) Предложенные аналитические зависимости позволяют рассчитывать характеристики теплообмена АФП с поперечными вставками из ТАМ в процессе его зарядки.

2) Приведенные аналитические решения непригодны для описания процессов разрядки в протяженном АФП с квадратными вставками в рассматриваемом диапазоне параметров. В этом случае рекомендуется использовать более сложные решения или численные методы.

Список литературы

1. Байрамов Р.Б., Чукаев А.Г., Арнагулиева Б.А. Исследование свойств гидрооксида натрия как теплоаккумулирующего материала для аккумуляторов фазовых переходов // Известия АН ТССР. 1992. № 1. С. 5-14.
2. [Arkar C., Medved S. Enhanced solar assisted building ventilation system using sphere encapsulated PCM thermal heat storage](#) // 2nd Workshop of IEA ECES IA Annex 17 “Advanced Thermal Energy Storage Techniques – Feasibility Studies and Demonstration Projects” (3-5 April 2002, Ljubljana, Slovenia).
3. Saito A., Saito A., Katayama K. Basic Research on a Thermal Energy Reservoir containing Latent Heat TES Cylindrical Capsules // Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers. 1986. Vol. 3, no. 1. P. 35-42. DOI: [10.11322/tjsrae.3.35](#)
4. Hiroshi I. [Operation Records of Encapsuled Heat Storage System](#) // 2nd Workshop of IEA ECES IA Annex 10 “Phase change materials and chemical reactions for thermal energy storage” (11–13 April 1998, Sofia, Bulgaria).
5. Россихин Н.А. Расчет и проектирование аккумуляторов теплоты на фазовых переходах (капсульного типа). М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 35 с.
6. Чукаев А.Г., Арнагулиева Б.А., Зорина И.Г. Математическое моделирование нестационарного сопряженного теплообмена при фазовопереходных процессах в компактных аккумуляторах теплоты // Известия АН ТССР. 1992. № 1. С. 93-96.
7. Зорина И.Г. Расчет гидродинамики и теплообмена в каналах со вставками с теплоаккумулирующим материалом: дис. ... канд. техн. наук. М., 1993. 186 с.
8. Kuravi S., Trahan J., Yogi Goswami D., Rahman M.M., Stefanakos E.K. Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants // Progress in Energy and Combustion Science. 2013. Vol. 39, iss. 4. P. 285-319. DOI: [10.1016/j.pecs.2013.02.001](#)
9. Лукьянов А.В., Остапенко В.В., Александров В.Д. Аккумуляторы тепловой энергии на основе фазового перехода // Вісник Донбаської національної академії будівництва та архітектури. 2010. № 6 (86). С. 64-68.
10. Россихин Н.А. Уравнение изменения массы фазы в аккумуляторе теплоты фазового перехода // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 5 (17). DOI: [10.18698/2308-6033-2013-5-726](#)

11. Россихин Н.А. Особенности расчета аккумуляторов теплоты на фазовых переходах с промежуточным теплоносителем // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 5 (17). DOI: [10.18698/2308-6033-2013-5-727](https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-5-727)
12. Россихин Н.А., Зорина И.Г., Чукаев А.Г. Расчет теплообмена в протяженных проточных аккумуляторах фазового перехода с учетом изменения соотношения фаз // Тезисы Международной научной конференции «Наука, техника и инновационные технологии в эпоху могущества и счастья», т. 1 (Ашхабат, 11-13 июня 2015 г.): тез. докл. Ашхабат, 2015. С. 32-34.
13. Россихин Н.А. Уравнение изменения фазового состава в капсульном аккумуляторе теплоты // Тезисы шестой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-6). В 3 т. Т. 2 (Москва, 27-31 октября 2014 г.): тез. докл. Москва, 2014. С. 215-216.

Calculation of Heat Exchange and Changing Phase Ratio in Extended Flowing Heat Accumulators on Phase Transitions with Rectangular Inserts

**I.G. Zorina^{1,*}, N.A. Rossihin¹,
A.G. Chukaev²**

[*zorina.ig@gmail.com](mailto:zorina.ig@gmail.com)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

²Branch of the Institute of Machines Science named after A.A. Blagonravov of
Russian Academy of Sciences “Research Center of Nonlinear Wave
Mechanics and Technology”, Moscow, Russia

Keywords: heat storage, charging, discharging, phase transition, liquid phase, solid phase

To use the renewable power sources such as solar, wind, biogas, and others is complicated because of their sporadic supply. Thus and so, energy accumulation makes the user independent on the operating mode of the power source.

Some of the heat accumulation methods can be realized with accumulators using phase transitions and based on the heat storage materials that change their state of aggregation during storage and rejection of thermal energy. In comparison with the gravel or liquid heat accumulators these devices are compact and provide high density of stored energy. To intensify heat exchange in such devices, are used highly heat-conductive metallic inclusions of different shape, capsular laying or heat storage materials placed in the form of inserts, extended heat exchange surfaces, etc.

Heat transfer of accumulator using phase transitions is calculated through solving a nonlinear Stefan problem. For calculation, are, usually, used various sufficiently time-consuming methods.

The paper presents a heat transfer calculation when changing the aggregation state of substance. Its recommendation is to use the analytical dependences that allow calculation of heat exchange characteristics with charging phase transition accumulators of a capsular type in which a heat storage material is in cross-inserts.

It is assumed that heat transfer in the coolant flow is one-dimensional, thermal and physical properties of heat storage material and coolant are constant, and heat transfer in the accumulator using phase transitions is quasi-stationary.

References

1. Bairamov R.B., Chukaev A.G., Arnagulieva B.A. Research of properties of sodium hydroxide as heat-accumulating material for batteries phase transitions. *Izvestiya AN TSSR = News of the Academy of Sciences of the Turkmen SSR*, 1992, no. 1, pp. 5-14. (in Russian).
2. [Arkar C., Medved S. Enhanced solar assisted building ventilation system using sphere encapsulated PCM thermal heat storage.](#) 2nd Workshop of IEA ECES IA Annex 17 “Advanced Thermal Energy Storage Techniques – Feasibility Studies and Demonstration Projects”, 3-5 April, 2002, Ljubljana, Slovenia.
3. Saito A., Saito A., Katayama K. Basic Research on a Thermal Energy Reservoir containing Latent Heat TES Cylindrical Capsules. *Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers*, 1986, vol. 3, no. 1, pp. 35-42. DOI: [10.11322/tjsrae.3.35](#)
4. Hiroshi I. [Operation Records of Encapsuled Heat Storage System.](#) 2nd Workshop of IEA ECES IA Annex 10 “Phase change materials and chemical reactions for thermal energy storage”, 11–13 April, 1998, Sofia, Bulgaria.
5. Rossikhin N.A. *Raschet i proektirovanie akkumulyatorov teploty na fazovykh perekhodakh (kapsul'nogo tipa)* [Calculation and design of heat accumulators on phase transitions (capsule type)]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010. 35 p. (in Russian).
6. Chukaev A.G., Arnagulieva B.A., Zorina I.G. Mathematical modeling of non-stationary conjugate heat transfer when phase [transitional](#) processes in compact batteries of heat. *Izvestiya AN TSSR = News of the Academy of Sciences of the Turkmen SSR*, 1992, no. 1, pp. 93-96. (in Russian).
7. Zorina I.G. *Raschet gidrodinamiki i teploobmena v kanalakh so vstavkami s teploakkumuliruyushchim materialom. Kand. diss.* [Calculation of hydrodynamics and heat transfer in channels with inserts with heat-accumulating material. Cand. diss.]. Moscow, 1993. 186 p. (in Russian).
8. Kuravi S., Trahan J., Yogi Goswami D., Rahman M.M., Stefanakos E.K. Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2013, vol. 39, iss. 4, pp. 285-319. DOI: [10.1016/j.pecs.2013.02.001](#)
9. Luk'yanov A.V., Ostapenko V.V., Aleksandrov V.D. Thermal energy accumulators based on phase transition. *Visnik Donbas'koï natsional'noï akademii budivnitstva ta arkhitekturi = Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2010, no. 6, pp. 64-68. (in Russian).
10. Rossikhin N.A. Equation of mass variation of the phase in the heat storage using phase change materials. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, no. 5. DOI: [10.18698/2308-6033-2013-5-726](#) (in Russian).
11. Rossikhin N.A. Calculation of the phase in the heat storage using phase change materials with an intermediate heat carrier. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, no. 5. DOI: [10.18698/2308-6033-2013-5-727](#) (in Russian).

12. Rossikhin N.A., Zorina I.G., Chukaev A.G. Calculation of heat transfer in extensive [running](#) batteries phase transition taking into account changes in correlation of phases. *Tezisy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Nauka, tekhnika i innovatsionnye tekhnologii v epokhu mogushchestva i schast'ya", t. 1: tez. dokl.* [Abstracts of the International scientific conference "Science, technique and innovation technologies in the epoch of power and happiness", vol. 1], Ashgabat, 11-13 June 2015. Ashgabat, 2015, pp. 32-34. (in Russian, unpublished).
13. Rossikhin N.A. Equation of change of phase composition in capsule accumulator of heat. *Tezisy shestoi Rossiiskoi natsional'noi konferentsii po teploobmenu (RNKT-6). V 3 t. T. 2: tez. dokl.* [Abstracts of 6th Russian national conference on heat transfer (RNKT-6). In 3 vols. Vol. 2], Moscow, 27-31 October 2014. Moscow, 2014, pp. 215-216. (in Russian, unpublished).