

Расчет процессов заряда и разряда в тепловом накопителе энергии (Часть II)

М. И. Куколев¹

Ю. К. Кукелев

Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет
Петрозаводский государственный университет

АННОТАЦИЯ

Во второй части статьи (первая – в [2]) приводится решение уравнений теплообмена, описывающих процессы заряда и разряда теплового накопителя (ТН) с плавящимся теплоаккумулирующим веществом, размещаемым в ячейках основных конструктивных форм – пластины, цилиндра, сферы.

Ключевые слова: тепловые накопители, решение уравнений теплообмена.

SUMMARY

This paper presents a solving of the heat transfer equations at the charge-discharge processes in thermal storage systems with melting materials and different geometry of cells.

Keywords: heat transfer, melting, heat storage systems.

Частный случай – расчет процессов заряда и разряда ТН с ячейкой в форме пластины – был рассмотрен в [2]. В данной статье приводится более общий подход для ячеек основных конструктивных форм – пластины, цилиндра, сферы. Рассмотрим ТН последовательного включения (рис. 1) для предпускового подогрева ДВС [3].

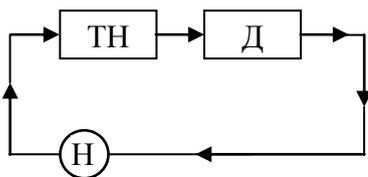


Рис. 1. Условная схема включения ТН:
ТН – тепловой накопитель, Д – двигатель;
Н – электронасос

Стрелками показано направление движения теплоносителя. При заряде нагретый в двигателе теплоноситель поступает в каналы ячеек ТН, где отдает теп-

лоту теплоаккумулирующему материалу (ТАМ). За счет плавления материала теплота накапливается. При разряде холодный теплоноситель поступает в каналы ячеек ТН, ТАМ затвердевает и отдает теплоту теплоносителю. Нагретый теплоноситель поступает за ТН на вход в холодный двигатель и нагревает его.

Перед записью систем уравнений, описывающих процессы заряда и разряда в ячейках тепловых накопителей (ТН) с плавящимся теплоаккумулирующим веществом, необходимо принять следующие допущения:

- 1) объем ТН постоянен;
- 2) изменения кинетической энергии и потенциальной незначительны;
- 3) параметры окружающей среды постоянны;
- 4) продолжительность процессов заряда и разряда конечна;
- 5) механизмами переноса теплоты в ТАМ являются теплопроводность и конвекция, доля переноса излучением незначительна и не учитывается;
- 6) процессы плавления и затвердевания ТАМ считаются одномерными;
- 7) перегрев и переохлаждение ТАМ отсутствуют, в исходном состоянии ТАМ имеет однородное распределение температуры T_m^* ;
- 8) число Стефана для теплоаккумулирующего материала мало;
- 9) теплоподвод и теплоотвод осуществляются однофазным теплоносителем с постоянной теплопроводностью, плотностью и расходным теплосодержанием;
- 10) коэффициенты теплопередачи к ТАМ при заряде и от него при разряде постоянны;
- 11) процессы теплопередачи к ТАМ при заряде и от него при разряде считаются одномерными.

На рис. 2 и 3 приведены расчетные схемы процессов заряда и разряда ТН. Здесь обозначены: T_{ci}^* – температура теплоносителя на входе в накопитель; T_{co}^* – температура теплоносителя на выходе из накопителя; T_{cw}^* – температура стенки емкости с теплоаккумулирующим материалом (принимается постоянной по всей нагреваемой поверхности $F^*(x_1)$); T_m^* , x_1^* , x_2^* – температура, начальная и конечная координаты границы фазового перехода “твердое тело – жидкость”.

¹ Авторы – соответственно доцент кафедры двигателей внутреннего сгорания СПбГПУ и доцент кафедры промышленной энергетики и энергосбережения ПетрГУ

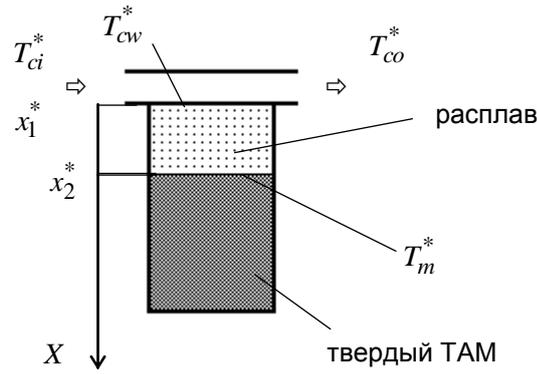


Рис. 2. Расчетная схема процесса заряда теплового накопителя последовательного включения с плавящимся теплоаккумулирующим материалом

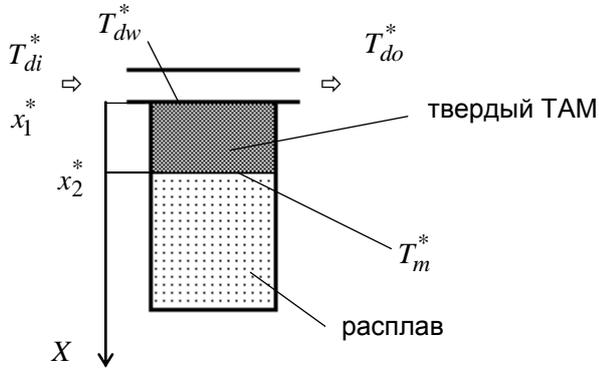


Рис. 3. Расчетная схема процесса разряда теплового накопителя

Для рассматриваемых схем справедливы следующие системы уравнений. Для заряда:

$$\begin{cases} Q_c^* = K_c^* F^*(x_1) \Delta T_c^* t_c^* , \\ K_c^* F^*(x_1) \Delta T_c^* t_c^* \eta_c = \frac{\lambda_l^*}{f^*(x_1, x_2)} (T_{cw}^* - T_m^*) t_c^* , \\ \frac{\lambda_l^*}{f^*(x_1, x_2)} (T_{cw}^* - T_m^*) t_c^* = \rho_l^* L^* F^*(x_2) w_c^* t_c^* , \end{cases}$$

где Q_c^* - подводимая энергия; K_c^* - коэффициент теплопередачи; $F^*(x_1)$, $F^*(x_2)$ - площади границы фазового перехода в начальный и конечный моменты времени; η_c - энергетический КПД; ΔT_c^* - температурный перепад “теплоноситель – стенка”;

t_c^* - время заряда; λ_l^* - коэффициент теплопроводности расплава; ρ_l^* - плотность теплоаккумулирующего материала в расплавленном состоянии; L^* - скрытая удельная теплота фазового перехода; w_c^* - скорость передвижения границы фазового перехода.

Для разряда:

$$\begin{cases} \rho_s^* L^* F^*(x_2) w_d^* t_d^* \eta_d = \frac{\lambda_s^*}{f^*(x_1, x_2)} (T_m^* - T_{dw}^*) t_d^* , \\ \frac{\lambda_s^*}{f^*(x_1, x_2)} (T_m^* - T_{dw}^*) t_d^* = K_d^* F^*(x_1) \Delta T_d^* t_d^* , \\ K_d^* F^*(x_1) \Delta T_d^* t_d^* = Q_d^* , \end{cases}$$

где обозначения аналогичны таковым в предыдущей системе, а индекс d указывает на разряд, s - на теплофизические характеристики теплоаккумулирующего материала в твердом состоянии.

Так как для накопления теплоты используется только

плавление, то $q_c^* = \frac{dQ_c^*}{dt^*} = \frac{dH_c^*}{dt^*} = L^* \cdot \frac{dM_l^*}{dt^*}$.

За время заряда происходит увеличение массы расплава $M_l^* = \rho_l^* \cdot w_c^* \cdot F^*(x_1) \cdot t_c^*$, следовательно:

$$q_c^* = L^* \cdot \rho_l^* \cdot \frac{d(w_c^* \cdot F^*(x_2) \cdot t_c^*)}{dt^*} .$$

Продифференцировав, получаем:

$$\begin{aligned} q_c^* &= L^* \cdot \rho_l^* \cdot (F^*(x_2) \cdot t_c^* \cdot \frac{dw_c^*}{dt^*} + \dots \\ &\dots + w_c^* \cdot t_c^* \cdot \frac{dF^*(x_2)}{dt^*} + w_c^* \cdot F^*(x_2)) . \end{aligned}$$

Выделение энергии при разряде происходит за счет

затвердевания жидкости: $q_d^* = L^* \cdot \frac{dM_s^*(t)}{dt^*}$. За

время разряда происходит увеличение массы твердого вещества: $M_s^*(t) = \rho_s^* \cdot w_d^* \cdot F^*(x_2) \cdot t_d^*$, следовательно,

$$q_d^* = L^* \cdot \rho_s^* \cdot \frac{d(w_d^* \cdot F^*(x_2) \cdot t_d^*)}{dt^*} .$$

Продифференцировав, получаем:

$$q_d^* = L^* \cdot \rho_s^* \cdot (F^*(x_2) \cdot t_d^* \cdot \frac{dw_d^*}{dt} + \dots \\ \dots + w_d^* \cdot t_d^* \cdot \frac{dF^*(x_2)}{dt} + w_d^* \cdot F^*(x_2)) \cdot \eta_d \cdot$$

Согласно схеме включения ТН в систему охлаждения ДВС (рис. 1):

$$q_c^* = m_c^* \cdot c_p^* \cdot (T_{ci}^* - T_{co}^*) \cdot \eta_c,$$

$$q_d^* = m_d^* \cdot c_p^* \cdot (T_{do}^* - T_{di}^*),$$

и, с учетом введенных в первой части статьи безразмерных величин, системы уравнений преобразуются к безразмерному виду:

$$\begin{cases} \Theta_{co} = 1 - \frac{N_c \cdot w_c}{\eta_c} \cdot R_c, \\ \Theta_{co} - \Theta_{cw} = \frac{w_c}{\eta_c} \cdot R_c, \\ \Theta_{cw} = w_c^2 \cdot \tau_c \cdot R_c \end{cases}$$

и

$$\begin{cases} \Theta_{do} = 1 - N_d \cdot w_d \cdot \eta_d \cdot R_d, \\ \Theta_{do} - \Theta_{dw} = w_d \cdot \eta_d \cdot R_d, \\ \Theta_{dw} = w_d^2 \cdot \tau_d \cdot R_d. \end{cases}$$

Здесь R_c, R_d обозначен комплекс:

$$R = \frac{\Phi \cdot \tau \cdot \frac{d\Phi^{-1}}{d\tau} + 1}{\Phi}$$

для заряда и разряда.

Из систем уравнений находим безразмерную скорость передвижения границы фазового перехода при заряде и разряде:

$$w_c = -0,5 \cdot \frac{N_c + 1}{\tau_c \cdot \eta_c} + ((0,5 \cdot \frac{N_c + 1}{\tau_c \cdot \eta_c})^2 + \dots \\ \dots + \frac{1}{R_c \cdot \tau_c})^{0,5},$$

$$w_d = -0,5 \cdot \frac{(N_d + 1) \cdot \eta_d}{\tau_d} + ((0,5 \cdot \frac{(N_d + 1) \cdot \eta_d}{\tau_d})^2 + \dots \\ \dots + \frac{1}{R_d \cdot \tau_d})^{0,5}$$

Формула справедлива для случая чистой теплопроводности. Если конструкция ячеек ТН позволяет развиться конвекции, что нежелательно с точки зрения снижения потерь энергии при хранении, то безразмерные скорости передвижения границы могут быть определены из следующих соображений [4].

Для теплового накопителя последовательного включения первые уравнения систем сохранятся:

$$\Theta_{co} = 1 - \frac{N_c \cdot w_c}{\eta_c} \cdot R_c,$$

$$\Theta_{do} = 1 - N_d \cdot w_d \cdot \eta_d \cdot R_d.$$

Средний перепад температур в канале при заряде:

$$\Delta T_c^* = \frac{T_{ci}^* - T_{co}^*}{\ln \frac{T_{ci}^* - T_{cw}^*}{T_{co}^* - T_{cw}^*}}$$

и разряде:

$$\Delta T_d^* = \frac{T_{do}^* - T_{di}^*}{\ln \frac{T_{dw}^* - T_{do}^*}{T_{dw}^* - T_{di}^*}}.$$

В случае конвекции температура стенки ячейки практически равна температуре плавления теплоаккумулирующего материала: $T_{cw}^* \approx T_m^*$ при заряде и соответственно $T_{dw}^* \approx T_m^*$ при разряде. Следовательно, $\Theta_{cw} = \Theta_{dw} = 0$. Тогда

$$\Delta T_c^* = \frac{T_{ci}^* - T_{co}^*}{\ln \frac{1}{\Theta_{co}}} \text{ и } \Delta T_d^* = \frac{T_{do}^* - T_{di}^*}{\ln \Theta_{do}}.$$

Как и в случае теплопроводности, будут справедливы соотношения при заряде:

$$\frac{\Delta T_c^*}{T_{ci}^* - T_m^*} = \frac{w_c}{\Phi \cdot \eta_c} \cdot \left(\frac{\tau_c}{w_c} \cdot \frac{dw_c}{d\tau_c} + \dots \right. \\ \left. \dots + \Phi \cdot \tau_c \cdot \frac{d\Phi^{-1}}{d\tau_c} + 1 \right)$$

и разряде:

$$\frac{\Delta T_d^*}{T_m^* - T_{di}^*} = \frac{w_d \cdot \eta_d}{\Phi} \cdot \left(\frac{\tau_d}{w_d} \cdot \frac{dw_d}{d\tau} + \dots \right. \\ \left. \dots + \Phi \cdot \tau_d \cdot \frac{d\Phi^{-1}}{d\tau} + 1 \right).$$

С учетом того, что

$$\frac{\tau_c}{w_c} \cdot \frac{dw_c}{d\tau_c} \rightarrow 0 \text{ и } \frac{\tau_d}{w_d} \cdot \frac{dw_d}{d\tau_d} \rightarrow 0,$$

преобразовываем:

$$1 - \Theta_{co} = \frac{w_c}{\eta_c} \cdot R_c \cdot \ln \frac{1}{\Theta_{co}},$$

$$\Theta_{do} - 1 = w_d \cdot \eta_d \cdot R_d \cdot \ln \Theta_{do}.$$

В то же время на основании первых уравнений систем можно получить:

$$\Theta_{co} = \exp(-N_c);$$

$$\Theta_{do} = \exp(-N_d).$$

Из равенств

$$1 - \frac{N_c \cdot w_c}{\eta_c} \cdot R_c = \exp(-N_c),$$

$$1 - N_d \cdot w_d \cdot \eta_d \cdot R_d = \exp(-N_d)$$

получаем выражения для безразмерной скорости передвижения границы фазового перехода при заряде:

$$w_c = \frac{1 - \exp(-N_c)}{N_c \cdot R_c} \cdot \eta_c$$

и разряде:

$$w_d = \frac{1 - \exp(-N_d)}{N_d \cdot R_d \cdot \eta_d}.$$

Коэффициенты формы:

1. Для пластины $F^*(x_1) = F^*(x_2)$, следовательно:

$$\Phi_{flat} = 1;$$

2. Цилиндр и сфера при $\Phi = \frac{d_1^*}{d_2^*}$ и обозначении

$$\text{комплекса } \frac{K_c^* \cdot d_{c1}^*}{2 \cdot \lambda_l^*} = m_c \text{ и } \frac{K_d^* \cdot d_{d1}^*}{2 \cdot \lambda_s^*} = m_d$$

имеют

$$\Phi_{cyl_c} = e^{-\frac{w_{c,cyl} \cdot \tau_c}{m_c}} \text{ и } \Phi_{sp_c} = 1 - \frac{w_{c,sp} \cdot \tau_c}{m_c}$$

при заряде и

$$\Phi_{cyl_d} = e^{-\frac{w_{d,cyl} \cdot \tau_d}{m_d}}, \Phi_{sp_d} = 1 - \frac{w_{d,sp} \cdot \tau_d}{m_d}$$

при разряде.

Температуры стенки ячейки и на выходе из канала определяются по зависимостям для заряда:

$$T_{cw}^* = T_m^* + (T_{ci}^* - T_m^*) \cdot w_c^2 \cdot \tau_c \cdot R_c,$$

$$T_{co}^* = T_{ci}^* - (T_{ci}^* - T_m^*) \cdot \frac{N_c \cdot w_c}{\eta_c} \cdot R_c$$

и разряда:

$$T_{dw}^* = T_m^* - (T_m^* - T_{di}^*) \cdot w_d^2 \cdot \tau_d \cdot R_d,$$

$$T_{do}^* = T_{di}^* + (T_m^* - T_{di}^*) \cdot N_d \cdot w_d \cdot \eta_d \cdot R_d.$$

При необходимости, если теплота ТН будет использоваться не только для предпускового разогрева ДВС, но и преобразовывается в полезную работу – к примеру, для создания пускового момента на валу при пуске двигателя или работы вспомогательных механизмов машины, – целесообразно оценить степень термодинамического совершенства проектируемого ТН с помощью эксергетического коэффициента полезного действия.

На этапе заряда он определяется как:

$$\psi_{c,I} = \frac{T_m - 1}{T_m} \cdot \eta_c \times \dots \\ \dots \times \frac{T_{ci} \cdot A}{T_{ci} \cdot A + \eta_c \cdot \ln(1 - A \cdot \eta_c^{-1})},$$

$$\text{где } A = \left(1 - \frac{T_m}{T_{ci}}\right) \cdot N_c \cdot w_c \cdot R_c.$$

При разряде можно использовать следующую зависимость:

$$\psi_d = \frac{T_m}{T_m - 1} \cdot R_d \cdot \left[\eta_d - \frac{\ln(1 + A \cdot \eta_d)}{T_{di} \cdot A} \right],$$

где $A = \left(\frac{T_m}{T_{di}} - 1 \right) \cdot N_d \cdot w_d \cdot R_d$.

В выражениях для ψ_c и ψ_d температуры представлены в безразмерном виде:

$$T_m = \frac{T_m^*}{T_{ds}^*}, T_{ci} = \frac{T_{ci}^*}{T_{ds}^*}, T_{di} = \frac{T_{di}^*}{T_{ds}^*}.$$

Таким образом, в соответствии с выбранной геометрией ячейки ТН с теплоаккумулирующим материалом рассчитывают R , τ и w . Затем определяют температуры стенок каналов T_{cw}^* , T_{dw}^* и на выходе из ТН - T_{co}^* , T_{do}^* . По эксергетическим коэффициентам ψ_c и ψ_d оценивают степень термодинамического совершенства конструкции и принимают решение об использовании энергии ТН только в целях предпускового подогрева ДВС или еще и для преобразования в полезную работу.

Тому, как на практике использовать полученные соотношения для расчета предпускового подогрева ДВС по схеме, приводимой на рис.1, будет посвящена отдельная статья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куколев М. И., Кукелев Ю. К. Расчет процессов заряда и разряда в тепловом накопителе энергии (Часть I) // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. Вып. 3. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2001. С. 48 – 51.
2. Куколев М. И., Кукелев Ю. К., Луценко Л. А. Расчет термодинамической эффективности проектируемой ячейки теплового аккумулятора с помощью безразмерной скорости передвижения границы фазового перехода // Труды Второй российской национальной конференции по теплообмену. М.: Изд-во МЭИ, 1998. Т. 3. С. 206 – 209.
3. Кукелев Ю. К., Куколев М. И. Тепловая подготовка лесовозных машин с помощью аккумуляторов тепла // Проблемы развития лесного комплекса Карелии: Тез. докл. республик. науч.-практ. конф. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1996. С. 24 – 25.
4. Куколев М. И. Основы проектирования тепловых накопителей энергии. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2001. С. 83-86.