

УДК 621.565.2

## Методика расчета аккумуляторов холода с веществами с фазовым переходом

Канд. техн. наук В. Ю. ЗАХАРОВА<sup>1</sup>, Р. О. ФАЙЗУЛЛИН,  
д-р техн. наук А. В. БАРАНЕНКО, П. А. КУЗНЕЦОВ

<sup>1</sup>vizakharova@itmo.ru

Университет ИТМО

*Применение веществ с фазовым переходом (ВФП) жидкость — твердое тело — жидкость является перспективным направлением аккумулирования тепловой энергии, в том числе холода. Аккумулирование осуществляется за счет скрытой теплоты фазового перехода (плавления). В статье приведены сведения о расчетных численных и аналитических моделях процессов в ВФП, позволяющих рассчитывать параметры имеющихся конструкций аккумуляторов. Приведены расчетные данные по величине теплового потока при разрядке капсул сферической формы, содержащих ВФП. В работе предложена методика инженерного расчета аккумуляторов холода на стадии проектирования для различных типов ВФП, расположенных в сферических капсулах в хладоносителе. Она позволяет определить необходимое количество капсул для достижения заданной мощности охлаждения. Для расчета времени разрядки предложена аналитическая зависимость, приемлемая при коэффициентах теплоотдачи с поверхности капсул, соответствующих вынужденному их обтеканию хладоносителем. Исходными данными для расчета служат физические свойства ВФП, свойства материала капсулы и ее геометрические параметры, а также коэффициент теплоотдачи от поверхности капсулы в хладоноситель. Представлены рекомендуемые зависимости для расчета коэффициента теплоотдачи при расположении капсул с ВФП в виде засыпок. Предложенные аналитические зависимости проверены сопоставлением с экспериментальными данными и численными расчетами для сферических контейнеров с внутренним диаметром 64 мм, заполненных n-тетрадеканом. Расхождение при расчете времени разморозки составило не более 3%. Представленная в работе методика расчета может быть использована при проектировании аккумуляторов холода с ВФП в сферических капсулах, в том числе для систем кондиционирования воздуха в зданиях.*

**Ключевые слова:** аккумулятор тепловой энергии, вещества с фазовым переходом, нестационарный теплообмен при фазовых переходах, математическое моделирование, системы кондиционирования воздуха.

### Информация о статье:

Поступила в редакцию 14.04.2021, принята к печати 14.05.2021

DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-2-13-20

Язык статьи — русский

### Для цитирования:

Захарова В. Ю., Файзуллин Р. О., Бараненко А. В., Кузнецов П. А. Методика расчета аккумуляторов холода с веществами с фазовым переходом // Вестник Международной академии холода. 2021. № 2. С. 13–20.

DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-2-13-20

## Method for calculating latent heat thermal energy storage

Ph. D. V. Y. ZAKHAROVA<sup>1</sup>, R. O. FAIZULLIN,

D. Sc. A. V. BARANENKO, P. A. KUZNETSOV

<sup>1</sup>vizakharova@itmo.ru

ITMO University

*Application of phase change material (PCM) is a promising direction of thermal energy storage, including cold. Accumulation is carried out due to the latent heat of the phase transition (melting). The article describes the information about the numerical and analytical process models for PCM. It can be used to calculate the parameters of existing battery designs. Calculated data on the value of the heat flux during the discharge of spherical capsules containing PCM are presented. The paper proposes a technique for engineering calculation of cold accumulators at the stage of designing cooling systems for various types of PCM located in the form of spherical containers in a coolant. The method allows estimating the number of capsules needed to achieve given cooling capacity of the system. To calculate the discharge time, an analytical dependence is proposed that corresponds to the forced flow around the container surface. The initial data for the calculation are the physical properties of the PCM, the properties of the capsule material, and its geometric parameters, as well as the coefficient of heat transfer from the surface of the capsule to the coolant. Recommended dependencies for calculating the heat transfer coefficient with the arrangement of capsules with PCM in the form of packed bed are presented. The proposed analytical*

*dependences are confirmed by comparison with the calculated data for a spherical container with an inner diameter of 64 mm, filled with n-tetradecane. The discrepancy in calculating the defrosting time was no more than 3%. The calculation method presented can be used in the design of latent heat thermal energy storage (LHTES) filled with spherical capsules. Such LHTES can additionally be used for air conditioning systems in buildings.*

**Keywords:** thermal energy storage, LHTES, PCM, non-stationary heat transfer with phase transitions, mathematical modeling, air conditioning systems.

#### Article info:

Received 14/04/2021, accepted 14/05/2021

DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-2-13-20

Article in Russian

#### For citation:

Zakharova V. Y., Faizullin R. O., Baranenko A. V., Kuznetsov P. A. Method for calculating latent heat thermal energy storage. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2021. No 2. p. 3-20. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-2-13-20

### Введение

Накоплению тепловой энергии в последние десятилетия уделяется все более пристальное внимание. Об этом свидетельствует увеличивающийся поток публикаций на эту тему [1]–[18]. Системы с аккумулярованием тепловой энергии обеспечивают уменьшение пиков потребления электроэнергии и экономии энергоресурсов, снижают капитальные и эксплуатационные затраты на соответствующие нужды [2, 4–6, 18].

Аккумулярование тепловой энергии актуально при переменных нагрузках потребителей и использовании энергии возобновляемых источников. В частности, солнечная энергия может использоваться только в дневное время. Ее аккумулярование дает возможность осуществлять круглосуточно процессы нагрева, горячего водоснабжения и охлаждения. Снятие пиковых нагрузок запасенной энергией позволяет устанавливать оборудование меньшей мощности. Аккумулярование тепловой энергии в наружных стенах и стеновых панелях обеспечивает повышение теплоустойчивости зданий и сокращение потребления электроэнергии для обеспечения комфортных температур воздуха в помещениях зданий.

Перспективным направлением в аккумуляровании тепловой энергии является использование веществ с фазовым переходом (ВФП). В аккумуляторах с ВФП объемная плотность накапливаемой энергии может быть выше на порядок в сравнении с системами, в которых используются жидкости. В работах [1, 4, 7, 15, 22] представлены обзоры свойств ВФП, предложенных для применения в системах аккумулярования тепловой энергии. В большинстве случаев это вещества с фазовыми переходами твердое тело — жидкость — твердое тело. Это могут быть органические и неорганические соединения и растворы, а также гидраты солей и эвтектики (эвтектические растворы). К органическим ВФП относятся парафины, жирные кислоты, эфиры. Эвтектики могут состоять только из органических или неорганических соединений, а также включать в свой состав как органические, так и неорганические вещества. В литературе названо порядка 1800 ВФП, которые могут применяться для аккумулярования тепловой энергии, в том числе в системах охлаждения и кондиционирования воздуха.

При прочих приемлемых свойствах важнейшими характеристиками таких веществ являются удельная теплота ( $\lambda$ ) и температура ( $t_{\text{фп}}$ ) фазового перехода. Чем выше

$\lambda$ , тем более высокой может быть объемная плотность накопления тепловой энергии. У известных ВФП  $t_{\text{фп}}$  находится преимущественно в пределах  $-100 \div 1100$  °С. Для систем охлаждения и кондиционирования воздуха представляют интерес ВФП с  $t_{\text{фп}}$  от 10 °С и ниже.

Накопление энергии холода может иметь сезонный или суточный характер, когда для этих целей используются низкие температуры наружного воздуха. Аккумулярование холода в ночное время компрессорными холодильными машинами при различных тарифах снижает расходы на электроэнергию.

Научные исследования применительно к холодильным системам с аккумулярованием холода направлены на повышение эффективности таких систем, использование возобновляемых источников энергии (в том числе в составе комплексов с абсорбционными холодильными машинами), разработку конструкций аккумуляторов холода с различными ВФП, улучшение свойств ВФП, изучение процессов при фазовых переходах и пр. [5, 6, 10–17, 20–22].

Аккумуляторы холода с ВФП представляют собой теплообменные аппараты, в которых происходит нестационарный теплообмен между циркулирующим хладоносителем и ВФП. Последние разделены между собой непроницаемыми перегородками. В подобных аккумуляторах как правило применяются ВФП твердое тело — жидкость. При зарядке аккумулятора (накоплении энергии холода) происходит фазовый переход ВФП жидкость — твердое тело с отводом теплоты фазового перехода хладоносителем. При разрядке аккумулятора (использовании энергии холода) осуществляется фазовый переход ВФП твердое тело — жидкость с подводом теплоты к ВФП и охлаждением при этом хладоносителя, который после аккумулятора подается к потребителю холода [8].

В доступной научной литературе представлены результаты аналитических и экспериментальных исследований аккумуляторов холода с ВФП, аналитические и численные модели расчетов процессов, протекающих в таких аппаратах [23]–[29].

Однако данные материалы не позволяют производить инженерные расчеты и проектирование рассматриваемых аккумуляторов холода с различными ВФП и хладоносителями, разной формой и размерами контейнеров с ВФП, различной геометрией их размещения в емкости и различными условиями обтекания контейнеров хладоносителем.

### Методика расчета

Технологии потребителей холода и мощности производства определяют требуемую температуру хладоносителя на выходе из аккумулятора  $t_{\text{вых}}$ , величину отводимого теплопритока  $Q_o$  и необходимый объем запасаемого холода  $Q_a$ .

Задача инженерного проектирования накопителей холода с ВФП заключается в создании аппаратов, которые отвечают перечисленным параметрам ( $t_{\text{вых}}$ ,  $Q_o$ ,  $Q_a$ ).

Авторы данной статьи предлагают методику расчета накопителей холода с ВФП. Рассмотрим аккумулятор, в емкости которого ВФП располагается в контейнерах. Они могут быть выполнены в виде сферы или близкой к сферической форме (рис. 1).

Как уже было отмечено, температура хладоносителя на выходе из аккумулятора  $t_{\text{вых}}$  определяется технологией потребителя холода. Охлаждение хладоносителя в теплообменных аппаратах обычно составляет 4–6 °С, а средняя логарифмическая разность температур в аппарате (Θ), как правило, находится в пределах 5–12 °С. Для рассматриваемых аппаратов названные величины перепадов температур являются усредненными поскольку теплообмен в таком типе аккумуляторов холода имеет нестационарный характер (рис. 2, 3). Указанные перепады температур позволяют определить температуру фазового перехода ВФП ( $t_{\text{фп}}$ ), по которой подбирается ВФП.

Требуемая для рассчитываемого аккумулятора холода масса ВФП ( $m$ ) вычисляется достаточно просто исходя из величины  $Q_a$ :

$$Q_a = m \cdot c(t_1 - t_2) + m\lambda. \quad (1)$$

Здесь  $t_1 > t_{\text{фп}}$  и  $t_2 < t_{\text{фп}}$ ;  $m$ ,  $c$ ,  $\lambda$  — масса, удельная теплоемкость и удельная теплота фазового перехода ВФП, соответственно;  $t_1$  и  $t_2$  — температура ВФП в начале и в конце зарядки аккумулятора.

Основной вклад в аккумулируемую энергию холода вносит множитель  $m\lambda$ .

Из выражения (1) получаем формулу (2) для расчета  $m$ :

$$m = 1,15 \frac{Q_a}{\lambda + c(t_1 - t_2)}. \quad (2)$$

В конце процесса разрядки аккумулятора холода с ВФП плотность теплового потока в аккумуляторе существенно снижается (рис. 2, результаты численных расчетов). Поэтому навряд ли целесообразно проводить разрядку до завершения фазового перехода ВФП. В связи с этим расчетную массу ВФП, размещаемого в аккумуляторе холода, следует увеличить на определенную величину. В приводимой методике авторы увеличивают ее на 15% (множитель 1,15 в уравнении (2)).

Нестационарность плотности теплового потока ( $q_c$ ) в аккумуляторах тепловой энергии с ВФП обусловлена увеличивающейся величиной термического сопротивления фракции ВФП (жидкой при разрядке аккумулятора и твердой при зарядке аккумулятора), примыкающей к внутренней стороне контейнера (см. рис. 1), а также уменьшающейся по геометрической прогрессии в процессе фазового перехода величиной поверхности контакта жидкой и твердой фаз ВФП.

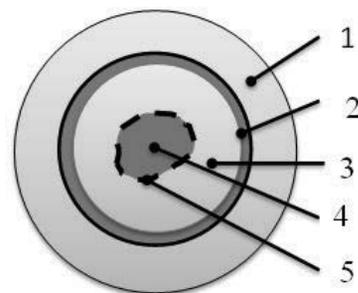


Рис. 1. ВФП в сферическом контейнере: 1 — хладоноситель; 2 — контейнер; 3 — жидкая фаза ВФП; 4 — твердая фаза; 5 — граница раздела фаз

Fig. 1. PCM in a spherical container: 1 — coolant; 2 — container; 3 — PCM liquid phase; 4 — solid phase; 5 — phase boundary

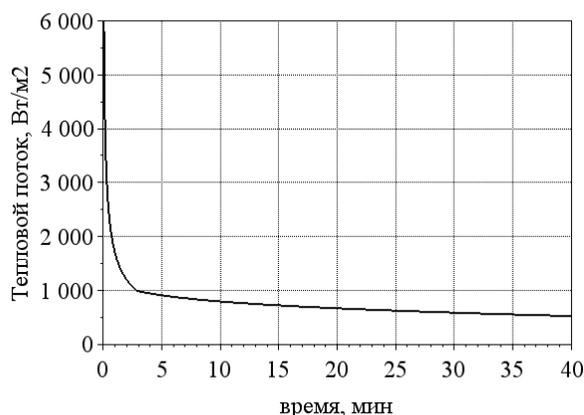


Рис. 2. Зависимость плотности теплового потока от времени при фазовом переходе твердое тело — жидкость для n-тетрадекана, размещенного в сферических капсулах диаметром 5 см [30]

Fig. 2. Dependence of heat flow density on time at phase transfer from solid to liquid for n-tetradecane placed in spherical capsules of 5 cm diameter [30]

Коэффициент теплоотдачи от поверхности контейнера ВФП к хладоносителю рассчитывается по приведенным ниже формулам.

Критерий Рейнольдса [31]:

$$Re = 2 \frac{r_n U}{\nu_{\text{хл}}}, \quad (3)$$

где  $r_n$  — внешний радиус контейнера с ВФП;  $\nu_{\text{хл}}$  — кинематическая вязкость хладоносителя;  $U$  — средняя скорость хладоносителя.

Скорость рассчитывается по формуле:

$$U = \frac{G}{F_{\text{ак}}}, \quad (4)$$

где  $G$  — объемный расход,  $F_{\text{ак}}$  — площадь поперечного сечения потока (без учета капсул).

Критерий Нуссельта [32]:

$$Nu = 0,825 Re^{0,62}. \quad (5)$$

Коэффициент теплоотдачи:

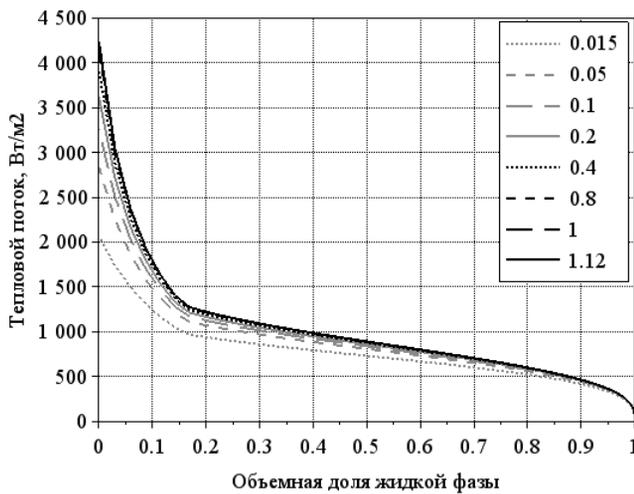


Рис. 3. Зависимость плотности теплового потока от величины объемной доли жидкой фракции  $n$  — тетрадекана в капсуле диаметром 5 см при фазовом переходе твердое тело-жидкость и скоростях движения хладоносителя 0,015–1,12 м/с [30]

Fig. 3. Dependence of heat flow density on the volume ratio of  $n$ -tetradecane liquid fraction in capsule of 5 cm diameter at phase transfer from solid to liquid and coolant velocity of 0.015–1.12 m/s [30]

$$a = \text{Nu} \frac{k_{\text{хл}}}{2r_{\text{н}}}, \quad (6)$$

где  $k_{\text{хл}}$  — теплопроводность хладоносителя.

Уравнение (6) справедливо для ромбической засыпки капсул и следующих значений критерия Рейнольдса  $2 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^4$ . Уравнения для критерия Нуссельта для других видов засыпок приведены в работе [33]. Зная диаметр капсулы и кинематическую вязкость теплоносителя, можно найти предельные скорости  $U_{\text{min}}$  и  $U_{\text{max}}$ , для которых допустимо применение данного уравнения:

$$U_{\text{max}} = \frac{2 \cdot 10^4 \cdot \nu_{\text{хл}}}{2 \cdot r_{\text{н}}}, \quad (7)$$

$$U_{\text{min}} = \frac{2 \cdot 10^2 \cdot \nu_{\text{хл}}}{2 \cdot r_{\text{н}}}. \quad (8)$$

По исследованиям авторов для данного типа аккумуляторов холода скорость хладоносителя при наружном обтекании капсул слабо влияет на интенсивность теплообмена (рис. 3). При кубической геометрии размещения капсул в емкости аккумулятора уравнение (5) будет справедливо для скоростей хладоносителя, лежащих в пределах 0,015–1,12 м/с.

В связи с тем, что процесс теплообмена в рассматриваемом аппарате имеет нестационарный характер, расчеты аппарата следует вести по усредненным величинам. В определенный период зависимости  $q_c$  от времени и объемной доли жидкой фракции  $\omega$  от теплового потока имеют линейный характер (рис. 2, 3).

По мнению авторов в расчетах следует оперировать средними значениями  $q_c$  и объемной доли жидкой фракции ВФП  $\omega$ .

Средняя величина  $q_c$  может быть вычислена исходя из времени разрядки контейнера с ВФП  $\tau_p$  и суммарного объема ВФП в одном контейнере  $V_c$ :

$$q_c = \frac{\lambda V_c \rho}{\tau_p F_c}, \quad (9)$$

здесь  $F_c$  — площадь поверхности контейнера, погруженного в хладоноситель;  $\rho$  — плотность ВФП.

Авторами предложена формула для оценки времени разрядки для сферического контейнера с ВФП, которая подходит для значений коэффициента теплоотдачи с поверхности контейнера, удовлетворяющих условию:

$$a \gg \frac{\pi r_b k_{\text{ж}}}{F_c}, \quad (10)$$

где  $r_b$  — внутренний радиус оболочки контейнера,  $k_{\text{ж}}$  — теплопроводность ВФП в жидком состоянии. Поскольку в процессе плавления ВФП в жидкой фазе возникают конвективные потоки, то на границе раздела фаз возникают участки с различной скоростью плавления. Это в свою очередь приводит к отклонению от первоначальной формы границы раздела фаз. Для учета этого отклонения в контейнерах близких к сферической форме, используется эффективное значение радиуса оболочки. Он соответствует радиусу сферы, объем которой равен объему твердой фазы.

Время полной разрядки сферической капсулы с ВФП определяется как:

$$\tau_p = \tau_k + \tau_n, \quad (11)$$

где  $\tau_n$  — время разрядки до начала конвекции в жидком слое ВФП,  $\tau_k$  — время разморозки после начала конвекции в жидком слое ВФП, определяющиеся по формулам:

$$\begin{aligned} \tau_n &= K_5 \left( \frac{b_k^2}{2} + K_2 \frac{b_k^3}{3} - \frac{1}{3} K_2 - \frac{1}{2} \right); \quad (12) \\ \tau_k &= 4\pi \frac{\lambda \rho r_b^3}{K_3 (t_{\text{ср}} - t_{\text{фп}})} \left( -\frac{1}{3} R \cdot K_3 b_k^3 - \frac{4}{9} (1 - b_k)^9 + \right. \\ &\quad \left. + \frac{4}{5} (1 - b_k)^5 - \frac{16}{45} \right). \quad (13) \end{aligned}$$

Здесь  $t_{\text{ср}}$  — средняя температура хладоносителя.

Параметр  $b_k$  определяет начало конвекции в жидком слое ВФП:

$$b_k = 1 - 3 \sqrt{\frac{1000 \nu^2}{b \cdot g \cdot \text{Pr} \cdot r_b^3 (t_{\text{ср}} - t_{\text{фп}})}}, \quad (14)$$

где  $b$  — коэффициент объемного расширения жидкой фазы ВФП;  $g$  — ускорение свободного падения;  $\text{Pr}$  — критерий Прандтля для ВФП;  $\nu$  — кинематическая вязкость ВФП в жидкой фазе.

Параметр  $R$  соответствует тепловому сопротивлению от внешнего слоя ВФП к теплоносителю и определяется по формуле [34]:

$$R = \frac{r_n - r_b}{4\pi r_b r_n k_c} + \frac{1}{\alpha F_c}, \quad (15)$$

где  $r_n$  — внешний радиус контейнера с ВФП,  $k_c$  — теплопроводность материала контейнера.

Остальные коэффициенты вычисляются следующим образом:

$$K_2 = (4\pi r_b k_T R - 1), \quad (16)$$

$$K_3 = 4\pi r_B^4 \cdot 0,18 k_{ж} \left( b \cdot g \frac{(t_{ср} - t_{фп})}{2v^2} Pr \right)^{0,25}, \quad (17)$$

$$K_5 = \frac{r_B^2 k_{ж} \rho}{k_T (t_{ср} - t_{фп})}, \quad (18)$$

где  $k_T$  — теплопроводность ВФП в твердом состоянии,  $k_{ж}$  — теплопроводность ВФП в жидком состоянии.

Тогда можно вычислить общую наружную поверхность капсул с ВФП:

$$F = \frac{Q_o}{q_c}. \quad (19)$$

Число капсул в аппарате должно составить:

$$N = \frac{F}{F_c}. \quad (20)$$

С другой стороны, число капсул в аккумуляторе может быть определено по параметрам контейнеров для ВФП и общей массе ВФП:

$$N_1 = \frac{m}{m_c}, \quad (21)$$

где  $N_1$  — число контейнеров;  $m_c$  — масса ВФП в одном контейнере.

Сопоставим величины  $N$  и  $N_1$ , для дальнейшего проектирования аппарата выбираем большую величину  $N$ .

Площадь теплообменной поверхности капсул в аппарате:

$$F_1 = N_1 F_c. \quad (22)$$

Далее выполняется эскизный проект размещения капсул в емкости аккумулятора. Обычно используется послойное размещение капсул [35], как показано на рис. 4.

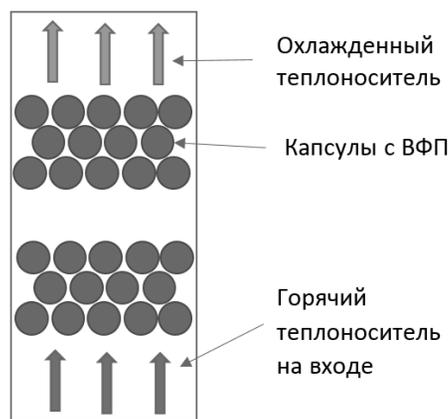


Рис. 4. Пример размещения капсул с ВФП  
Fig. 4. An arrangement of capsules with PCM

Производим поверочный расчет аппарата, в котором определяем среднюю степень охлаждения хладоносителя в емкости аккумулятора при его разрядке.

Определяем время отвода пикового теплопритока из заданных заказчиком условий проектирования:

$$\tau_3 = \frac{Q_a}{Q_o}. \quad (23)$$

Найдем расчетное время снятия пикового теплопритока:

$$\tau_p = \frac{Q_a}{q_c F}. \quad (24)$$

Для поверочного расчета также могут использоваться численные методы [30].

### Результаты расчетов и экспериментов

Для проверки методики расчета времени разморозки капсулы с ВФП проведено сравнение результатов расчетов, полученных численным методом по методике, описанной в [30] и экспериментальными данными для н-тетрадекана в качестве ВФП. Исходные данные для расчетов приведены в табл. 1.

В табл. 2 приведены результаты расчетов времени разморозки капсулы, полученные по результатам численных расчетов, экспериментальных исследований на стенде и расчетов по формуле (11).

Таблица 1  
Исходные данные для расчетов

#### Initial data for calculations

Внутренний диаметр сферического корпуса, м	0,064
Внешний диаметр сферического корпуса, м	0,066
Температура плавления ВФП, °С	6,1
Плотность ВФП, кг/м <sup>3</sup>	762,8
Динамическая вязкость ВФП, Па·с	2,13·10 <sup>-3</sup>
Удельная теплоемкость ВФП, Дж/(кг·К)	2198
Коэффициент теплопроводности ВФП, Вт/(м·К)	0,143
Удельная теплота плавления ВФП, Дж/кг	215000
Коэффициент объемного расширения ВФП, 1/К	0,000904
Коэффициент теплопроводности корпуса (стекло), Вт/(м·К)	1,14
Плотность корпуса, кг/м <sup>3</sup>	2200
Удельная теплоемкость корпуса, Дж/(кг·К)	670
Температура теплоносителя, °С	25
Ускорение свободного падения, м/с <sup>2</sup>	9,81
Начальная температура колбы с ВФП, °С	3,6
Внешняя поверхность теплоотдачи колбы, м <sup>2</sup>	0,01269

Tabel 1

Таблица 2  
Результаты расчетов времени разморозки для капсул, полученные различными методами

Table 2  
Calculations results for the time of capsules' defrosting obtained by various methods

	Время, мин
Экспериментальные данные	38
Численные расчеты	38
Аналитические расчеты	39

Таким образом, отклонение результатов расчетов по формуле (11) от численных и экспериментальных данных составило не более 3%.

### Выводы

Предложенная формула для расчета времени разморозки капсул с ВФП показывает хорошую сходимость

с экспериментальными и численными данными для типичных размеров капсул и перспективных веществ.

Представленная в настоящей статье методика расчета может быть использована при инженерном проектировании аккумуляторов холода с ВФП, находящегося в сферических капсулах, которые послойно размещаются в емкости аккумулятора.

### Литература

1. *Pereira da Cunha J., Eames P.* Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials — A review // *Applied Energy*. 2016. Vol. 177. P. 227–238.
2. *Technology Roadmap — Energy Storage*. International Energy Agency, 2014. 31 p.
3. *Rabczak S.* Free-Cooling in Seasonal Cold Accumulator // *International Journal of New Technology and Research*. 2015. Vol. 1. No 8. P. 49–52.
4. *Veerakumar C., Sreekumar A.* Phase change material based cold thermal energy storage: Materials, techniques and applications — A review // *International Journal of Refrigeration*. 2016. Vol. 67. P. 271–289.
5. *Al-Aifan B., Parameshwaran R., Mehta K., Karunakaran R.* Performance evaluation of a combined variable refrigerant volume and cool thermal energy storage system for air conditioning applications // *International Journal of Refrigeration*. 2017. Vol. 76. P. 271–295.
6. *Kim G. T., Choi Y. U., Chung Y., Kim M. S., Park K. W., Kim M. S.* Experimental study on the performance of multi-split heat pump system with thermal energy storage // *International Journal of Refrigeration*. 2018. Vol. 88. P. 523–537.
7. *Li G., Hwang Y., Radermacher R.* Review of cold storage materials for air conditioning application // *International Journal of Refrigeration*. 2012. Vol. 35. No 8. P. 2053–2077.
8. *Iten M., Liu S.* A work procedure of utilising PCMs as thermal storage systems based on air-TES systems // *Energy Conversion and Management*. 2014. Vol. 77. P. 608–627.
9. *Bosholm F., López-Navarro A., Gamarra M., Corberán J. M., Payá J.* Reproducibility of solidification and melting processes in a latent heat thermal storage tank // *International Journal of Refrigeration*. 2016. Vol. 62. P. 85–96.
10. *Qiao Y., Du Y., Muehlbauer J., Hwang Y., Radermacher R.* Experimental study of enhanced PCM exchangers applied in a thermal energy storage system for personal cooling // *International Journal of Refrigeration*. 2019. Vol. 102. P. 22–34.
11. *Morimoto T., Kawana Y., Saegusa K., Kumano H.* Supercooling characteristics of phase change material particles within phase change emulsions // *International Journal of Refrigeration*. 2019. Vol. 99. P. 1–7.
12. *Shin D., Park J., Choi S., Ko H., Karng S., Shin Y.* A new type of heat storage system using the motion of phase change materials in an elliptical-shaped capsule // *Energy Conversion and Management*. 2019. Vol. 182. P. 508–519.
13. *Amagour M., Rachek A., Bennajah M., Touhami M.* Experimental investigation and comparative performance analysis of a compact finned-tube heat exchanger uniformly filled with a phase change material for thermal energy storage // *Energy Conversion and Management*. 2018. Vol. 165. P. 137–151.
14. *Biedenbach M., Poetzsch L., Gschwander S.* Characterization of an n-octadecane PCS in a 0.5 m<sup>3</sup> storage tank test facility // *International Journal of Refrigeration*. 2019. Vol. 104. P. 76–83.

### References

1. *Pereira da Cunha J., Eames P.* Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials — A review. *Applied Energy*. 2016. Vol. 177. P. 227–238.
2. *Technology Roadmap. Energy Storage*. International Energy Agency, 2014. 31 p.
3. *Rabczak S.* Free-Cooling in Seasonal Cold Accumulator. *IJNTR*. 2015. Vol. 1. No. 8. P. 49–52.
4. *Veerakumar C., Sreekumar A.* Phase change material based cold thermal energy storage: Materials, techniques and applications — A review. *International Journal of Refrigeration*. 2016. Vol. 67. P. 271–289.
5. *Al-Aifan B., Parameshwaran R., Mehta K., Karunakaran R.* Performance evaluation of a combined variable refrigerant volume and cool thermal energy storage system for air conditioning applications. *International Journal of Refrigeration*. 2017. Vol. 76. P. 271–295.
6. *Kim G. T., Choi Y. U., Chung Y., Kim M. S., Park K. W., Kim M. S.* Experimental study on the performance of multi-split heat pump system with thermal energy storage. *International Journal of Refrigeration*. 2018. Vol. 88. P. 523–537.
7. *Li G., Hwang Y., Radermacher R.* Review of cold storage materials for air conditioning application. *International Journal of Refrigeration*. 2012. Vol. 35. No. 8. P. 2053–2077.
8. *Iten M., Liu S.* A work procedure of utilising PCMs as thermal storage systems based on air-TES systems. *Energy Conversion and Management*. 2014. Vol. 77. P. 608–627.
9. *Bosholm F., López-Navarro A., Gamarra M., Corberán J. M., Payá J.* Reproducibility of solidification and melting processes in a latent heat thermal storage tank. *International Journal of Refrigeration*. 2016. Vol. 62. P. 85–96.
10. *Qiao Y., Du Y., Muehlbauer J., Hwang Y., Radermacher R.* Experimental study of enhanced PCM exchangers applied in a thermal energy storage system for personal cooling. *International Journal of Refrigeration*. 2019. Vol. 102. P. 22–34.
11. *Morimoto T., Kawana Y., Saegusa K., Kumano H.* Supercooling characteristics of phase change material particles within phase change emulsions. *International Journal of Refrigeration*. 2019. Vol. 99. P. 1–7.
12. *Shin D., Park J., Choi S., Ko H., Karng S., Shin Y.* A new type of heat storage system using the motion of phase change materials in an elliptical-shaped capsule. *Energy Conversion and Management*. 2019. Vol. 182. P. 508–519.
13. *Amagour M., Rachek A., Bennajah M., Touhami M.* Experimental investigation and comparative performance analysis of a compact finned-tube heat exchanger uniformly filled with a phase change material for thermal energy storage. *Energy Conversion and Management*. 2018. Vol. 165. P. 137–151.
14. *Biedenbach M., Poetzsch L., Gschwander S.* Characterization of an n-octadecane PCS in a 0.5 m<sup>3</sup> storage tank test facility. *International Journal of Refrigeration*. 2019. Vol. 104. P. 76–83.

15. Pielichowska K., Pielichowski K. Phase change materials for thermal energy storage // *Progress in Materials Science*. 2014. Vol. 65. P. 67–123.
16. Mostafavi Tehrani S. S., Shoraka Y., Nithyanandam K., Taylor R. A. Shell — and — tube or packed bed thermal energy storage systems integrated with a concentrated solar power: A techno — economic comparison of sensible and latent heat systems // *Applied Energy*. 2019. Vol. 238. P. 887–910.
17. Rathod M. K., Banerjee J. Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 18. P. 246–258.
18. Venegas — Troncoso T., Ugarte — Larraguibel G., Vasco D. A., Rouault F., Pérez R. Feasibility study of the application of a cooling energy storage system in a chiller plant of an office building located in Santiago, Chile // *International Journal of Refrigeration*. 2019. Vol. 102. P. 142–150.
19. Allouche Y, Varga S, Bouden C, Oliveira A. C. Experimental determination of the heat transfer and cold storage characteristics of a microencapsulated phase change material in a horizontal tank // *Energy Conversion and Management*. 2015. Vol. 94. P. 275–285.
20. Sokhansefat T., Mohammadi D., Kasaeian A., Mahmoudi A. R. Simulation and parametric study of a 5-ton solar absorption cooling system in Tehran // *Energy Conversion and Management*. 2017. Vol. 148. P. 339–351.
21. Ezan M. A., Ozcan Doganay E., Yavuz F. E., Tavman I. H. A numerical study on the usage of phase change material (PCM) to prolong compressor off period in a beverage cooler // *Energy Conversion and Management*. 2017. Vol. 142. P. 95–106.
22. Gil A., Oró E., Peiró G., Álvarez S., Cabeza L. F. Material selection and testing for thermal energy storage in solar cooling // *Renewable Energy*. 2013. Vol. 57. P. 366–371.
23. Bédécarrats J. P., Strub F., Falcon B., Dumas J. P. Phase-change thermal energy storage using spherical capsules: performance of a test plant // *International Journal of Refrigeration*. 1996. Vol. 19. No. 3. P. 187–196.
24. Beasley D. E., Ramanarayanan C., Torab H. Thermal response of a packed bed of spheres containing a phase-change material // *International Journal of Refrigeration*. 1989. Vol. 13. No. 3. P. 253–265.
25. Benmansour A., Hamdan M. A., Bengueuddach A. Experimental and numerical investigation of solid particles thermal energy storage unit // *Applied Thermal Engineering*. 2006. Vol. 26. No. 5–6. P. 513–518.
26. Wei J., Kawaguchi Y., Hirano S., Takeuchi H. Study on a PCM heat storage system for rapid heat supply // *Applied Thermal Engineering*. 2005. Vol. 25. No. 17–18. p. 2903–2920.
27. Arkar C., Medved S. Influence of accuracy of thermal property data of a phase change material on the result of a numerical model of a packed bed latent heat storage with spheres // *Thermochimica Acta*. 2005. Vol. 438. No. 1–2. P. 192–201.
28. Loem S., Deethayat T., Asanakham A., Kiatsiriroat T. Thermal characteristics on melting/solidification of low temperature PCM balls packed bed with air charging/discharging // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2019. Vol. 14. P. 100431.
29. Kumar B., Abhishek A., Chung J. D. New effective thermal conductivity model for the analysis of unconstrained melting in an entire thermal storage tank // *Journal of Energy Storage*. 2020. Vol. 30. P. 101447.
15. Pielichowska K., Pielichowski K. Phase change materials for thermal energy storage. *Progress in Materials Science*. 2014. Vol. 65. P. 67–123.
16. Mostafavi Tehrani S. S., Shoraka Y., Nithyanandam K., Taylor R. A. Shell-and-tube or packed bed thermal energy storage systems integrated with a concentrated solar power: A techno-economic comparison of sensible and latent heat systems. *Applied Energy*. 2019. Vol. 238. P. 887–910.
17. Rathod M. K., Banerjee J. Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 18. P. 246–258.
18. Venegas — Troncoso T., Ugarte — Larraguibel G., Vasco D. A., Rouault F., Pérez R. Feasibility study of the application of a cooling energy storage system in a chiller plant of an office building located in Santiago, Chile. *International Journal of Refrigeration*. 2019. Vol. 102. P. 142–150.
19. Allouche Y, Varga S, Bouden C, Oliveira A. C. Experimental determination of the heat transfer and cold storage characteristics of a microencapsulated phase change material in a horizontal tank. *Energy Conversion and Management*. 2015. Vol. 94. P. 275–285.
20. Sokhansefat T., Mohammadi D., Kasaeian A., Mahmoudi A. R. Simulation and parametric study of a 5-ton solar absorption cooling system in Tehran. *Energy Conversion and Management*. 2017. Vol. 148. P. 339–351.
21. Ezan M. A., Ozcan Doganay E., Yavuz F. E., Tavman I. H. A numerical study on the usage of phase change material (PCM) to prolong compressor off period in a beverage cooler. *Energy Conversion and Management*. 2017. Vol. 142. P. 95–106.
22. Gil A., Oró E., Peiró G., Álvarez S., Cabeza L. F. Material selection and testing for thermal energy storage in solar cooling. *Renewable Energy*. 2013. Vol. 57. P. 366–371.
23. Bédécarrats J. P., Strub F., Falcon B., Dumas J. P. Phase-change thermal energy storage using spherical capsules: performance of a test plant. *International Journal of Refrigeration*. 1996. Vol. 19. No. 3. P. 187–196.
24. Beasley D. E., Ramanarayanan C., Torab H. Thermal response of a packed bed of spheres containing a phase-change material. *International Journal of Refrigeration*. 1989. Vol. 13. No. 3. P. 253–265.
25. Benmansour A., Hamdan M. A., Bengueuddach A. Experimental and numerical investigation of solid particles thermal energy storage unit. *Applied Thermal Engineering*. 2006. Vol. 26. No. 5–6. P. 513–518.
26. Wei J., Kawaguchi Y., Hirano S., Takeuchi H. Study on a PCM heat storage system for rapid heat supply. *Applied Thermal Engineering*. 2005. Vol. 25. No. 17–18. p. 2903–2920.
27. Arkar C., Medved S. Influence of accuracy of thermal property data of a phase change material on the result of a numerical model of a packed bed latent heat storage with spheres. *Thermochimica Acta*. 2005. Vol. 438. No. 1–2. P. 192–201.
28. Loem S., Deethayat T., Asanakham A., Kiatsiriroat T. Thermal characteristics on melting/solidification of low temperature PCM balls packed bed with air charging/discharging. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2019. Vol. 14. P. 100431.
29. Kumar B., Abhishek A., Chung J. D. New effective thermal conductivity model for the analysis of unconstrained melting in an entire thermal storage tank. *Journal of Energy Storage*. 2020. Vol. 30. P. 101447.

30. Zakharova V. Y., Kuznetsov P. A., Baranenko A. V., Faizullin R. O. Calculation of cold accumulators with phase change materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 826. № 1. P. 012040.
31. Монин А. С. Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности / Монин А. С., Яглом А. М. М.: Наука, 1965. 640 с.
32. Янкаускас Р. И. Влияние проницаемости стенок на теплоотдачу шаровых укладок / Янкаускас Р. И., Сурвила В. Ю. // ВАНТ. Серия: Атомно-водородная энергетика и технология. 1958. №. 1 (20). С. 25–26.
33. Деменок С. Л. Гидродинамика и теплообмен в шаровых укладках: монография / Деменок С. Л., Медведев В. В., Сивуха С. М. СПб.: Страта, 2012. 192 с.
34. Дульнев Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Высшая школа, 1984. 247 с.
35. А. с. 1719875 СССР, МКИ 5 F28 13/12. Теплообменная труба / Сударев В. В., Деменок С. Л., Медведев В. В., Сударев В. В. — 4812016/06; заявлено 30.04.90; опубл. 15.03.92, Бюл. 10. С. 3.
30. Zakharova V. Y., Kuznetsov P. A., Baranenko A. V., Faizullin R. O. Calculation of cold accumulators with phase change materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 826. No. 1. P. 012040.
31. Monin A. S., Yaglom A. M. Statistical fluid mechanics. Mechanics of turbulence. Moscow, Nauka, 1965, 640 p. (in Russian)
32. Yankauskas R. I., Survila V. Yu. Influence of wall permeability on heat transfer of ball stacks. *VANT. Series: Atomic — Hydrogen Energy and Technology*, 1958, No. 1 (20), pp. 25–26. (in Russian).
33. Demenok S. L., Medvedev V. V., Sivukha S. M. Hydrodynamics and heat transfer in ball packings: monograph. Saint Petersburg, Strata, 2012, 192 p. (in Russian)
34. Dulnev G. N. Heat and mass transfer in electronic equipment. Moscow, High School, 1984, 247 p. (in Russian)
35. Copyright certificate 1719875 USSR, MKI 5 F28 13/12. Heat exchange pipe. Sudarev V. V., Demenok S. L., Medvedev V. V., Sudarev V. B. — 4812016/06; declared 30.04.90; Publ. 15.03.92, Byul. 10. P. 3. (in Russian)

### Сведения об авторах

#### Захарова Виктория Юрьевна

К. т. н., доцент факультета энергетики и экотехнологий Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, vizakharova@itmo.ru, ORCID ID: 0000-0002-8554-3260

#### Файзуллин Рафаэль Олегович

Аспирант факультета энергетики и экотехнологий Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, rofaizullin@itmo.ru, ORCID ID: 0000-0002-3045-4447

#### Бараненко Александр Владимирович

Д. т. н., профессор, Советник при Ректорате Университета ИТМО, 191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, avbaranenko@itmo.ru, ORCID ID: 0000-0003-3675-9513

#### Кузнецов Павел Александрович

Аспирант факультета энергетики и экотехнологий Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, klimatpiter@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4284-3463

### Information about authors

#### Zakharova Victoria Y.

Ph. D., Associate professor of Faculty of Energy and Ecotechnology of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, vizakharova@itmo.ru, ORCID ID: 0000-0002-8554-3260

#### Faizullin Rafael O.

Graduate student of Faculty of Energy and Ecotechnology of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, rofaizullin@itmo.ru, ORCID ID: 0000-0002-3045-4447

#### Baranenko Aleksandr V.

D. Sc., Professor, Advisor to Rector's Office of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, avbaranenko@itmo.ru, ORCID ID: 0000-0003-3675-9513

#### Kuznetsov Pavel A.

Graduate student of Faculty of Energy and Ecotechnology of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, klimatpiter@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4284-3463

## О Перечне рецензируемых научных изданий

В соответствии с приказом Минобрнауки России от 25 июля 2014 г., 1 декабря 2015 г. сформирован Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

**Вестник Международной академии холода** включен в Перечень рецензируемых научных изданий (по состоянию на 21.04.2021 г.) под № 409.

Подробная информация о группах научных специальностей/научным специальностям и соответствующим им отраслям науки, по которым журнал включен в Перечень, на сайте ВАК:

<https://vak.minobrnauki.gov.ru/uploader/loader?type=19&name=91107547002&f=8118>