

Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 12. С. 550–556  
Thermal processes in engineering, 2025, vol. 17, no. 12, pp. 550–556

Научная статья  
УДК 62-971  
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=187094>  
EDN: <https://www.elibrary.ru/GUUBXZ>

## Метод параметрической идентификации теплопередающей способности тепловых аккумуляторов

Н.О. Борщев 

*Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Москва, Российская Федерация  
[www.moriarty93@mail.ru](mailto:www.moriarty93@mail.ru)* 

**Аннотация.** В данной работе представлен метод параметрической идентификации эффективного коэффициента теплопроводности пальмитовой кислоты, используемой в качестве теплоносителя в тепловом аккумуляторе, работающем на принципе плавление – кристаллизация. Коэффициент теплопроводности ищется как произведение его параметризованного значения на соответствующую базисную функцию, учитывающую его зависимость от температуры. Задача идентификации исследуемой величины решается в экстремальной постановке на основе минимизации среднеквадратичной ошибки между теоретическим и экспериментальным температурным полем в местах установки датчиков температур. В качестве численного метода оптимизации выбран метод сопряженных направлений как наиболее точный метод первого порядка сходимости. Если разница идентифицируемых значений параметризованного коэффициента теплопроводности меньше систематической погрешности датчика температуры, считается итерационный процесс идентификации окончен, иначе описанная ранее последовательность выполняется до достижения требуемой точности расчета.

**Ключевые слова:** тепловой аккумулятор, пальмитовая кислота, метод сопряженных направлений, метод итерационной регуляризации, обратная задача теплопроводности

**Для цитирования.** Борщев Н.О. Метод параметрической идентификации теплопередающей способности тепловых аккумуляторов // Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 12. С. 550–556.  
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=187094>

Original article

## Method of parametric identification of heat transfer capacity of thermal accumulators

N.O. Borshchev✉

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (JIHT RAS), Moscow, Russian Federation

[www.moriarty93@mail.ru](mailto:www.moriarty93@mail.ru)✉

**Abstract.** This paper presents a method for the parametric identification of the effective thermal conductivity coefficient of palmitic acid used as a heat transfer fluid in a thermal energy storage system operating on the melting-solidification principle. The thermal conductivity coefficient is sought as the product of its parameterized value and a corresponding piecewise linear continuous basis function that accounts for its temperature dependence.

The identification problem for the studied quantity is solved in an extreme formulation based on minimizing the mean squared error between the theoretical and experimental temperature fields at the locations of the temperature sensors. Prior to this, it is necessary to first define the formulation of the “direct” heat transfer problem inside the device, as well as the initial value of the parameterized thermal conductivity coefficient in each temperature basis block. This problem formulation is solved using an implicit finite-difference scheme with linearization of the nonlinear boundary conditions relative to the temperature taken from the previous time step, as well as the heat and mass transfer coefficients.

Subsequently, the mean squared error between the theoretical and experimental temperatures at the sensor locations is compiled and minimized. The conjugate directions method was chosen as the numerical optimization technique due to its high accuracy as a first-order convergence method, ensuring convergence in a minimal number of iterative approximations. To implement this optimization method, the descent step and the component of the gradient of the residual functional are first determined. The descent step is found based on the minimum of the studied functional at each calculation iteration. The component of the gradient of the residual functional is found by differentiating the sought heat exchange problem formulation with respect to the parameterized value of the thermal conductivity coefficient and is subsequently solved similarly to the direct heat exchange problem, given the a priori known temperature values at the nodes of the finite-difference grid.

If the difference between the identified values of the parameterized thermal conductivity coefficient is less than the systematic error of the temperature sensor, the iterative identification process is considered complete; otherwise, the aforementioned sequence is repeated until the required calculation accuracy is achieved.

**Keywords:** thermal energy storage, palmitic acid, conjugate directions method, iterative regularization method, inverse heat conduction problem

**For citation.** Borshchev N.O. Method of parametric identification of heat transfer capacity of thermal accumulators. *Thermal processes in engineering*. 2025, vol. 17, no. 12, pp. 550–556. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=187094>

### 1. Введение

Рациональное использование энергетических ресурсов является одной из приоритетных задач современной теплоэнергетики. Одним из наиболее эффективных способов ее решения выступа-

ет применение тепловых аккумуляторов (ТА), позволяющих согласовать во времени несоответствующие графики генерации и потребления тепловой энергии. Тепловой аккумулятор представляет собой устройство, накапливающее избыточ-

ное тепло от источника (котел, солнечный коллектор, тепловой насос) для последующей его передачи в систему теплопотребления в периоды пиковой нагрузки или при отсутствии генерации. Это не только повышает КПД системы в целом, но и увеличивает ресурс основного оборудования, обеспечивает стабильность теплового режима и значительную экономию топливно-энергетических ресурсов [1–6].

Принцип действия всех тепловых аккумуляторов основан на фундаментальных законах термодинамики. Классификация проводится по физическому принципу накопления энергии. Наиболее распространенным типом являются аккумуляторы с явной теплотой, где энергия запасается за счет нагрева материала без изменения его агрегатного состояния. Основным аккумулярующим материалом здесь выступает вода, что обусловлено ее высокой удельной теплоемкостью (4,182 кДж/(кг×К)), доступностью и низкой стоимостью. Конструктивно такие аппараты, часто называемые буферными емкостями, представляют собой стальные баки цилиндрической формы с высокоэффективной тепловой изоляцией. Расчет полезной емкости и тепловых потерь регламентирован методиками, основанными на определении теплоемкости и теплопередачи.

Более прогрессивным типом являются аккумуляторы с латентной теплотой, использующие энергию фазового перехода (ПКМ – материалы с фазовым переходом). В качестве рабочего тела применяются парафины, гидраты солей и эвтектические смеси, которые при плавлении/кристаллизации поглощают/выделяют значительное количество энергии при постоянной температуре [7]. Главное преимущество ПКМ – высокая объемная плотность аккумулирования энергии, что позволяет значительно уменьшить габариты устройства. Перспективным, но наименее освоенным на практике направлением считаются термохимические аккумуляторы, где тепловая энергия запасается в виде химической потенциальной энергии в ходе обратимых реакций. Однако первоочередной задачей проектирования теплового режима данного устройства является получение априорной информации о его тепло-транспортных характеристиках в обеспечении уточненного проектирования теплового режима термостатируемого оборудования. В данной работе предлагается метод идентификации коэф-

фициента теплопроводности данного устройства, работающего на пальмитовой кислоте по результатам экспериментальной тепловой отработки на основе параметрического метода идентификации, в основу которого лежим минимизации среднеквадратичного отклонения между теоретическим и экспериментальным полем температур в местах установки датчиков температур. Первостепенной задачей при реализации данного метода лежит составление адекватной тепловой физико-математической постановки задачи.

## 2. Тепловая физико-математическая модель теплового аккумулятора

Рассмотрим ТА при несимметричном двустороннем тепловом нагреве, теплоносителем в котором является пальмитовая кислота. Принципиальная тепловая расчетная схема теплового аккумулятора представлена на рисунке 1.

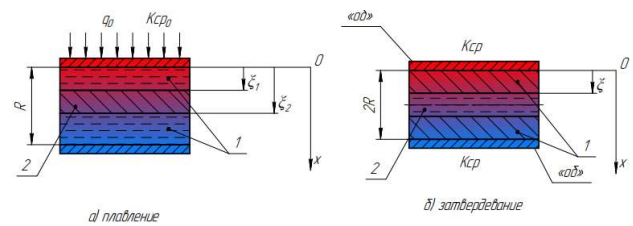


Рис. 1. Тепловая расчетная схема теплового аккумулятора (ТА)

При идентификации коэффициента теплопроводности от поверхности корпуса аккумулятора к теплоносителю, необходимо сперва решить «прямую» задачу теплового режима изделия. Тепловая физико-математическая модель устройства при допущениях о однонаправленном нагреве, а также без учета теплового расширения материала корпуса ТА представлена ниже. Тепловая физико-математическая модель без учета термогравитационной конвекции [1–5]:

Для теплового аккумулятора:

$$\frac{\partial T_{12}(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{C_{12}(T_{12})\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_{12}(T_{12}) \frac{\partial T_{12}(x, \tau)}{\partial x} \right];$$

$$T_{12}(x, 0) = T_0;$$

$$\lambda_1(T_{12}) \frac{\partial T_{12}(\xi_{12}, \tau)}{\partial x} =$$

$$= \lambda_2(T_{12}) \frac{\partial T_2(\xi_{12}, \tau)}{\partial x} - r\rho_2 \frac{\partial \xi_{12}(\tau)}{\partial \tau};$$

$$\lambda_1(T_{12}(0, \tau)) \frac{\partial T_{12}(0, \tau)}{\partial x} = k_{12}(T_{об}(\tau) - T_{12}(0, \tau));$$

Для оболочки:

$$\begin{aligned} \lambda_1(T_{12}(0, \tau)) \frac{\partial T_{об}(\tau)}{\partial \tau} &= \\ &= k_{12}(T_{12}(0, \tau) - T_{об}(\tau)) + k_{cp}(T_w - T_{12}(\tau)); \\ T_{об}(0) &= T_0. \end{aligned}$$

Тепловая физико-математическая модель с учетом термогравитационной конвекции:

Для теплового аккумулятора:

$$\frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{C_2(T_2)\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_2(T_2) \frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial x} \right];$$

$$T_2(x, 0) = T_0;$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_2(0, \tau)}{\partial x} &= \\ &= \frac{\alpha_{об}(T_1 - T_{об}(\tau)); T_2(0, \tau) < T_{кр};}{\rho_2 r \frac{\partial \xi(\tau)}{\partial \tau}} = \lambda_2(T_2(\xi, \tau)) \frac{\partial T_2(\xi, \tau)}{\partial x} + \end{aligned}$$

$$+ \alpha_{кр}(T_1(\tau) - T_{об}(\tau)); T_2(0, \tau) = T_{кр}; 0 = \xi;$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_2(l_x, \tau)}{\partial x} &= \\ &= \frac{\alpha_{об}(T_1 - T_{об}(\tau)); T_2(l_x, \tau) < T_{кр};}{\rho_2 r \frac{\partial \xi(\tau)}{\partial \tau}} = \lambda_2(T_2(\xi, \tau)) \frac{\partial T_2(\xi, \tau)}{\partial x} + \end{aligned}$$

$$+ \alpha_{кр}(T_1(\tau) - T_{об}(\tau)); T_2(l_x, \tau) = T_{кр}; l_x = \xi.$$

Для оболочки:

$$\begin{aligned} C_{об} \rho_{об} \delta_{об} \frac{\partial T_{об}(\tau)}{\partial \tau} &= \\ &= q + K_{об}(T_w - T_{об}(\tau)) + \alpha_{об}(T_1 - T_{об}(\tau)). \end{aligned}$$

Для теплоносителя:

$$\begin{aligned} C_1 \rho_1 \xi_1 \frac{\partial T_1(\tau)}{\partial \tau} &= \\ &= \alpha_{об}(T_1 - T_{об}(\tau)) + \alpha_{кр}(T_{кр} - T_1(\tau)); \\ T_1(0) &= T_0; \end{aligned}$$

$C_{1,2}$  – удельная теплоемкость для теплоаккумулирующего вещества (Дж/(кгК)) для твердой и жидкой фаз;  $\lambda_{1,2}$  – коэффициент теплопроводности для теплоаккумулирующего вещества для твердой и жидкой фаз, Вт/(м×К);  $T_{1,2}$  – температура для теплоаккумулирующего вещества в твердой и жидкой фазах, К;  $\rho_{1,2}$  – плотность твердой и жидкой фазы вещества в ТА, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – время, с;  $x$  – координата, м;  $r$  – скрытая теплота плавления, Дж/кг;  $K_{об}$  – коэффициент теплопередачи, Вт/К;  $T_{об}$  – температура оболочки ТА, К;

Данная система уравнений решается численно при линеаризации лучисто-конвективного теплового потока относительно температуры, взятой с предыдущего временного слоя. Частное дифференциальное уравнение для плавящегося вещества решается конечно-разностным методом неявной схемой путем решения семейства линейных уравнений методом прогонки. Обыкновенные дифференциальные уравнения, описывающие изменение среднеобъемной температуры оболочки ТА и теплоносителя, решаются методом Рунге–Кутты 4 порядка точности.

### 3. Параметрическая идентификация коэффициента теплопроводности в ТА

Представим зависимость коэффициента эффективной теплопроводности теплоаккумулирующего вещества в ТА как функцию от температуры при аппроксимации линейно-непрерывными базисными функциями в следующих видах [8, 9]:

$$\lambda(T) = \sum_{m=1}^M \lambda_p N_m(T).$$

Рассмотрим восстановление эффективного коэффициента теплопроводности (с начала эффекта термической реакции плавления) на основе среднеквадратичного функционала невязки между теоретическим и экспериментальным полем температур [8–12]:

$$S(\lambda_p) = \frac{1}{2} \int_0^{\tau_{\max}} \sum_{m=1}^M [T(\lambda_p, \bar{x}, \bar{\tau}) - \bar{T}(\bar{x}, \bar{\tau})]^2 d\tau.$$

В работе используется метод безусловной минимизации функционала  $S$  с помощью метода сопряженных градиентов, как наиболее точного метода первого порядка точности, позволяющего достичь требуемой сходимости за минимальное число итераций.

4. Анализ вычислительных свойств метода

Для проведения валидации разработанного метода рассмотрен модельный эксперимент с ТА, работающем на парафине, где при фазовом переходе имеет место термогравитационная конвекция. В работе [13] рассмотрен теплофизический эксперимент по определению теплового состояния данного устройства на установке с использование хромель–алюмелевых датчиков температур, принципиальный вид которой изображен на рисунке 2.

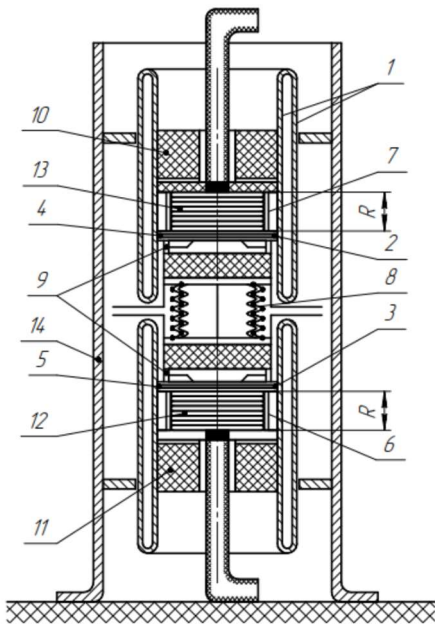


Рис. 2. Экспериментальная установка по определению тепловой проводимости ТА (1 – стеклянная колба; 2, 3 – обогреватели; 4, 5 – резиновые прокладки; 6, 7 – каркасы с датчиками температур; 8 – сифон; 9 – бобышки; 10, 11 – теплоизоляция; 12, 13 – полости с рабочим веществом, 14 – ограждающая конструкция)

Данная установка работает по следующему принципу: для исследования теплопереноса при плавлении использовались размещенные внутри стеклянной колбы дисковые нагреватели. Рабочее вещество с помощью сифона прижималось к поверхности нагревателя. В процессе эксперимента определялась температура на корпусе обогревателя и поле температур по толщине вещества. Координаты границы раздела фаз фиксировались по превышению критической температуры плавления. При исследовании процесса затвердевания вместо нагревателей устанавливались пустотельные диски, через внутренние полости которых просачивалась вода с постоян-

ной температурой. В случаях исключения свободной конвекции в жидкой фазе, тепло подводилось сверху, при затвердевании снизу.

Для оценки влияния термогравитационной конвекции на тепловую проводимость ТА, в работе [13] был проведен теплофизический эксперимент по затвердеванию и плавлению пальмитовой кислоты. На рисунке 3 показан график пространственно-временного распределения температурного поля в местах установки датчиков температур по толщине ТА при задании температуры оболочки 4 °С.

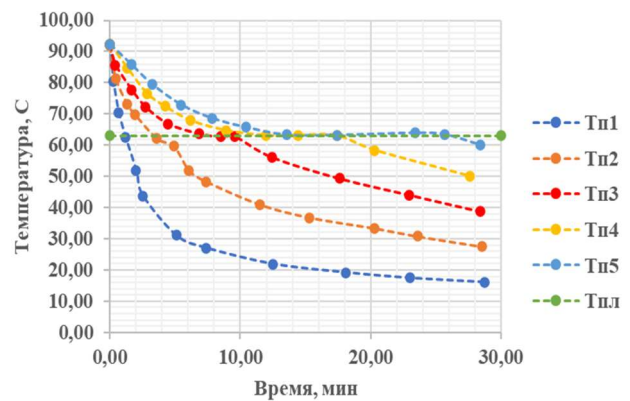


Рис. 3. Результаты замеров температур в ходе теплофизического эксперимента затвердевания пальмитовой кислоты (1 – температура ФПМ на глубине 0,002 м, 2 – температура на глубине 0,004 м, 3 – температура на глубине 0,006 м, 4 – температура ТА на глубине 0,008 м, 5 – температура ТА на глубине 0,01)

На рисунке 4 показан процесс плавления ТА на пальмитовой кислоте с учетом термогравитационной конвекции в ходе экспериментальной тепловой отработки.

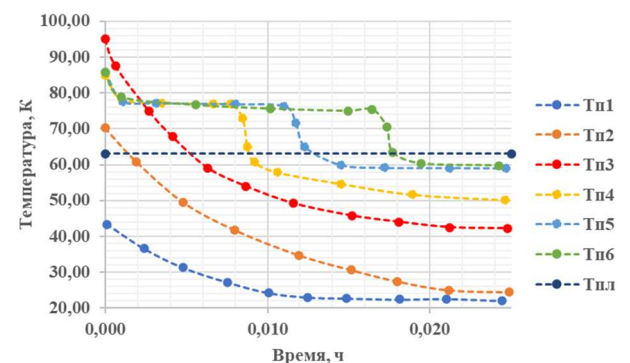
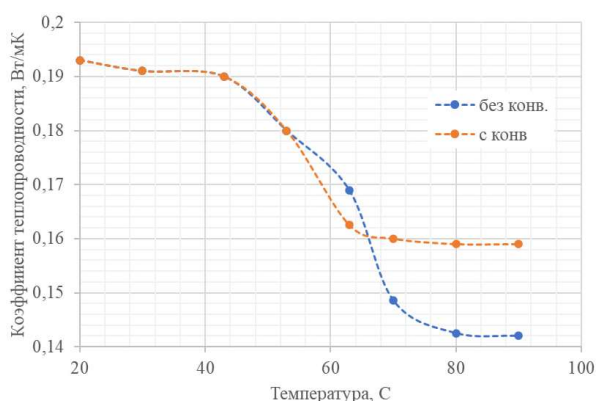


Рис. 4. Результаты замеров температур в ходе теплофизического эксперимента плавления пальмитовой кислоты в процессе плавления при наличии свободной конвекции ( $q = 2200 \text{ Вт/м}^2$ ;  $(C\rho\delta)_{об} = 21000 \text{ Дж/(м}^2\text{К)}$ ); 1 – через 0,08 ч; 2 – через 0,21 ч; 3 – через 0,44 ч; 4 – через 0,5 ч; 6 – через 0,8 ч)



**Рис. 5.** Значения коэффициента теплопроводности плавящегося вещества в ТА (1 – идентифицируемое эффективное значение коэффициента теплопроводности (с начала эффекта термической реакции плавления), 2 – коэффициент теплопроводности парафина в жидком состоянии)

Как видно из анализа графических зависимостей, идентифицированное значение коэффициента теплопроводности пальмитовой кислоты выше при наличии термогравитационной конвекции, что объясняется дополнительным вкладом коэффициента теплоотдачи в теплопередающую способность устройства. При выходе на стационарный режим, локальная температурная погрешность между двумя коэффициентами теплопроводности составляет (0,02 Вт/мК).

## 5. Выводы

1. Разработан метод параметрической идентификации эффективного коэффициента теплопроводности в ТА на основе минимизации среднеквадратичного отклонения между теоретическим и экспериментальным температурным полем в местах установки датчиков температур при анализе экспериментальных данных процессов плавления при наличии термогравитационной конвекции и кристаллизации. Данная задача решалась методом итерационной регуляризации в приближении однонаправленного прогресса для атмосферных условий проведения тепловой обработки ТА.

2. Продемонстрированы результаты данного алгоритма на примере определения эффективного коэффициента теплопроводности ТА, работающего на пальмитовой кислоте, результаты показали, что при уровне температур 20–80 °С значения эффективного коэффициента теплопроводности будет варьироваться в пределах  $0,16\text{--}0,19 \frac{\text{Вт}}{\text{мК}}$ .

3. Данный метод определения тепловой проводимости такого типа устройств, работающих на фазовом переходе, является принципиально новым. Алгоритм может быть использован и для более широкого температурного диапазона для определения эффективного коэффициента теплопроводности ТА в обеспечении уточненных тепловых физико-математических моделей СОТР.

## Список источников

- Sharma A., Tyagi V.V., Chen C.R. et al. Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009. Vol. 13. № 2. pp. 318–345.
- Zalba B., Marin J.M., Cabeza L.F. et al. Review on Thermal Energy Storage with Phase Change: Materials, Heat Transfer Analysis and Applications // *Applied Thermal Engineering*. 2003. Vol. 23. № 3. pp. 251–283.
- Farid M.M., Khudhair A.M., Razack S.A.K. et al. A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications // *Energy Conversion and Management*. 2004. Vol. 45. № 9–10. pp. 1597–1615.
- Incropera F.P., DeWitt D.P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*: Wiley, 2007.
- Tritt T.M. *Thermal Conductivity: Theory, Properties, and Applications*: Springer; 2004.
- Parker W.J. et al. Flash Method of Determining Thermal Diffusivity // *Journal of Applied Physics*. 1961.
- Zhang Y., Faghri A. Heat Transfer Enhancement in Latent Heat Thermal Energy Storage Systems // *Journal of Heat Transfer*. 2010. Vol. 132. № 6.
- Borshchev N.O. Parametric Identification of Thermal Conductivity in Highly Porous Materials under Space Environment Conditions // *Reliability and Quality of Complex Systems*. 2022. № 4 (40). pp. 98–109.
- Borshchev N.O. Determination of the Effective Heat Transfer Coefficient in Evaporative-Condensing Heat Exchangers // *the XXXIX Siberian Thermophysical Seminar*. (2023). pp. 16–26.
- Alifanov O.M., Budnik S.A., Nenarokomov A.V. et al. Investigation of Thermophysical Properties of Fibrous Thermal Protection Materials at High Temperatures // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2021. Vol. 94. № 4. pp. 1074–1084.
- Nenarokomov A.V., Zinkevich V.P. Analysis of Heat Transfer under Mechanical Impact on Multilayer Insulation // *Thermal Processes in Engineering*. 2021. Vol. 13. № 12. pp. 555–560.
- Nenarokomov A.V., Budnik S.A., Semenov D.S. Study of Radiative-Conductive Heat Transfer Using Non-Contact Measurements. Part 2: Validation of the Computational-Experimental Method // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2023. Vol. 96. № 4. pp. 978–986.
- Alekseev V.A. *Fundamentals of Thermal Energy Storage Design for Spacecraft*. Kursk: Naukomet, 2016. p. 71.

## References

1. Sharma A, Tyagi VV, Chen CR et al. Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009;13(2):318–345.
2. Zalba B, Marín JM, Cabeza LF et al. Review on Thermal Energy Storage with Phase Change: Materials, Heat Transfer Analysis and Applications. *Applied Thermal Engineering*. 2003;23(3):251–283.
3. Farid MM, Khudhair AM, Razack SAK et al. A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications. *Energy Conversion and Management*. 2004; 45(9–10):1597–1615.
4. Incropera FP, DeWitt DP. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*: Wiley; 2007.
5. Tritt TM. *Thermal Conductivity: Theory, Properties, and Applications*: Springer; 2004.
6. Parker WJ et al. Flash Method of Determining Thermal Diffusivity. *Journal of Applied Physics*. 1961.
7. Zhang Y, Faghri A. Heat Transfer Enhancement in Latent Heat Thermal Energy Storage Systems. *Journal of Heat Transfer*. 2010;132(6).
8. Borshchev NO. Parametric Identification of Thermal Conductivity in Highly Porous Materials under Space Environment Conditions. *Reliability and Quality of Complex Systems*. 2022;4(40):98–109.
9. Borshchev NO. Determination of the Effective Heat Transfer Coefficient in Evaporative-Condensing Heat Exchangers. *the XXXIX Siberian Thermophysical Seminar*. (2023). pp. 16–26.
10. Alifanov OM, Budnik SA, Nenarokomov AV et al. Investigation of Thermophysical Properties of Fibrous Thermal Protection Materials at High Temperatures. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2021;94(4): 1074–1084.
11. Nenarokomov AV, Zinkevich VP. Analysis of Heat Transfer under Mechanical Impact on Multilayer Insulation. *Thermal Processes in Engineering*. 2021;13(12): 555–560.
12. Nenarokomov AV, Budnik SA, Semenov DS. Study of Radiative-Conductive Heat Transfer Using Non-Contact Measurements. Part 2: Validation of the Computational-Experimental Method. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2023;96(4):978–986.
13. Alekseev VA. *Fundamentals of Thermal Energy Storage Design for Spacecraft*. Kursk: Naukomet; 2016. p. 71.