

doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-3-505-512

УДК 536.6

Восстановление нестационарного теплового потока от аккумулятора тепловой энергии путем решения обратной задачи теплопроводности

Николай Васильевич Пилипенко¹, Павел Андреевич Колодийчук^{2✉},
Виктория Юрьевна Захарова³, Рафаэль Олегович Файзуллин⁴

^{1,2,3,4} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ pilipenko38@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9328-3166>

² pkolodiychuk@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-9984-1613>

³ vizakharova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8554-3260>

⁴ rofaizullin@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3045-4447>

Аннотация

Введение. Рассмотрена задача восстановления нестационарного теплового потока от хладоносителя к теплоаккумулирующему веществу отдельного элемента теплового аккумулятора. Решение задачи позволяет избежать ошибок, связанных с усреднением теплового потока по всем аккумуляторным элементам, и предоставляет возможность находить оптимальные размеры и состав наполнителя для каждого элемента аккумулятора. Задача особенно актуальна для каскадных аккумуляторов, где одновременно применяются элементы с различными наполнителями. **Метод.** Проведено сравнение двух методов решения задачи. Первый метод основан на численном моделировании процесса разрядки аккумулятора тепловой энергии с использованием программного пакета Computational Fluid Dynamics. Второй метод, представленный в настоящей работе, основан на параметрической идентификации дифференциально-разностной модели переноса тепла с решением обратной задачи теплопроводности совместно со сквозным счетом. Предлагаемый метод позволяет сглаживать скачкообразно изменяющиеся теплофизические характеристики и учитывать подвижную границу раздела фаз вещества. **Основные результаты.** Метод решения обратной задачи теплопроводности дает возможность существенно уменьшить время восстановления нестационарных граничных условий теплообмена для всего аккумулятора. В результате снижаются требования к вычислительным ресурсам при проектировании и оптимизации аккумулятора за счет облегчения экспериментального перебора. Впервые рассмотрено и предложено применение метода параметрической идентификации и сквозного счета при решении задачи Стефана. **Обсуждение.** Полученные результаты могут быть использованы для вычисления теплового потока от отдельного элемента аккумулятора тепловой энергии.

Ключевые слова

аккумулирование тепловой энергии, математическое моделирование, восстановление теплового потока, обратная задача теплопроводности, нелинейный фильтр Калмана

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Университета ИТМО в рамках проекта «Повышение эффективности энергетических систем путем использования аккумуляторов тепловой энергии» (№ 620150).

Ссылка для цитирования: Пилипенко Н.В., Колодийчук П.А., Захарова В.Ю., Файзуллин Р.О. Восстановление нестационарного теплового потока от аккумулятора тепловой энергии путем решения обратной задачи теплопроводности // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 3. С. 505–512. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-3-505-512

Restoration of unsteady heat flow from a thermal energy accumulator by solving the inverse heat conduction problem

Nikolai V. Pilipenko¹, Pavel A. Kolodiychuk²✉, Victoria Yu. Zakharova³, Rafael O. Faizullin⁴

^{1,2,3,4} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ pilipenko38@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9328-3166>

² pkolodiychuk@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-9984-1613>

³ vizakharova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8554-3260>

⁴ rofaizullin@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3045-4447>

Abstract

This paper considers the problem restoring a non-stationary heat flow from a coolant to a heat-storing substance of a separate element of a thermal accumulator. Solving the problem allows avoiding errors associated with averaging the heat flow over all battery cells, and provides the opportunity to find the optimal sizes and composition of the filler for each battery cell. The problem is especially relevant for cascade batteries where cells with different fillers are simultaneously used. A comparison is made of two methods for solving the problem. The first method is based on numerical simulation of the thermal energy storage discharge process using the Computational Fluid Dynamics software package. The second approach proposed by the authors is based on the parametric identification of a differential-difference model of heat transfer with the solution of the inverse problem of heat conduction together with coefficient smoothing calculation. The proposed method makes it possible to smooth out abruptly changing thermophysical characteristics and take into account the moving phase boundary of a substance. The method for solving the inverse heat conduction problem can significantly reduce the recovery time of non-stationary boundary conditions of heat transfer for the entire battery and, thus, reduce the requirements for computing resources when designing and optimizing the battery by facilitating experimental search. For the first time, the use of the method of parametric identification and calculation of smoothing coefficients for solving the Stefan problem was considered and proposed. The results obtained can be used to calculate the heat flow from an individual element of a thermal energy accumulator.

Keywords

thermal energy accumulation, mathematical modeling, heat flow restoration, inverse heat conduction problem, Kalman filter

Acknowledgements

This study was supported by ITMO University as part of the project “Increasing the efficiency of energy systems through the use of thermal energy batteries” (No. 620150).

For citation: Pilipenko N.V., Kolodiychuk P.A., Zakharova V.Yu., Faizullin R.O. Restoration of unsteady heat flow from a thermal energy accumulator by solving the inverse heat conduction problem. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 3, pp. 505–512 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-3-505-512

Введение

Увеличение спроса в мире на электроэнергию и истощение ископаемых природных ресурсов являются ключевыми факторами развития энергоэффективных технологий [1].

Солнечные, приливные и ветряные электростанции не обладают постоянством генерирующих мощностей [2] и без использования дополнительного оборудования не гарантируют стабильность передачи электроэнергии потребителю. Для бесперебойного снабжения электроэнергией применяются различные системы накопления тепловой энергии, которые могут размещаться как на стороне клиента, так и на стороне поставщика. Эксплуатация аккумуляторов пользователем снижает пиковые нагрузки на инфраструктуру поставщика и обеспечивает защищенность от кратковременных сбоев работы сети [3].

Аналогичный характер использования имеют системы вентиляции и охлаждения: в дневное время наблюдается пик потребления, а ночью активность уменьшается [4]. Применение накопителей холода является перспективной формой аккумулирования энергии [5–7]. В работах [8–12] описаны результаты экспериментальных исследований, в которых отсутствуют значения теплового потока от аккумуляторного элемента к те-

плоносителю. При этом были зафиксированы температуры хладоносителя на входе и выходе из резервуара аккумулятора, с использованием которых проводился расчет теплового потока. Значения теплового потока, полученные подобным образом, являются приближенными, поскольку включают в себя теплопритоки от окружающей среды через внешние стенки резервуара. В случае распределения элементов в виде засыпки с упорядоченной структурой (рис. 1) [13], выполненные расчеты характеризуют усредненный тепловой поток после прохождения слоя засыпки, не описывая тепловой поток от отдельных элементов. В эксперименте, приведенном в работе [9], наблюдается неравномерность скорости плавления в слое засыпки, что указывает на отклонения значений теплового потока отдельных элементов. В результате снижается эффективность работы аккумулятора тепловой энергии, поскольку максимальная энергоемкость приходится на теплоту фазового перехода, а часть аккумулятора уже прошла через фазовый переход и находится в нерабочем режиме, в отличие от оставшегося массива аккумулятора.

В связи с этим становится важным определение нестационарного теплового потока между хладоносителем и отдельным элементом в засыпке. Это позволит не только избежать ошибок, связанных с усреднением теплового потока по всем аккумуляторным элементам,

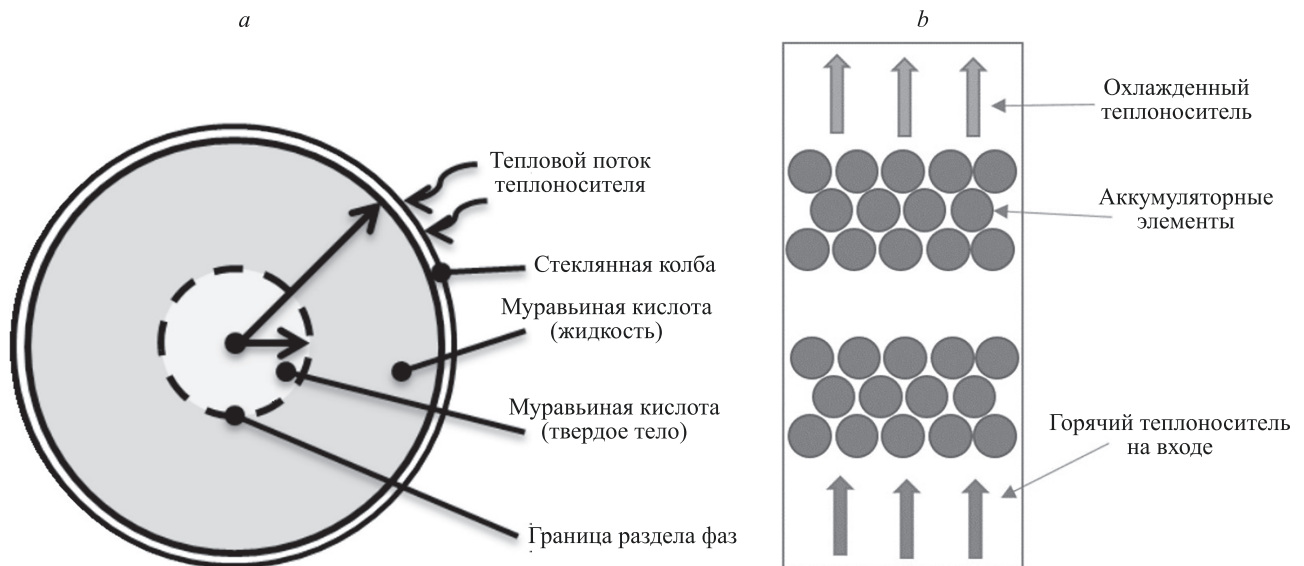


Рис. 1. Модель теплового аккумулятора: тепловая модель аккумуляторного элемента — капсулы (а); размещение капсул в аккумуляторе (b)

Fig. 1. Thermal accumulator model: thermal model of the battery element — capsule (a); placement of capsules in the battery (b)

но также предоставит возможность находить оптимальные размеры и состав наполнителя для каждого элемента в процессе эксперимента. Решение данной задачи особенно актуально для каскадных аккумуляторов, где одновременно применяются элементы с различными диаметрами капсул и их наполнителями [14, 15].

Постановка задачи и цель исследований

Необходимо восстановить нестационарный тепловой поток от теплоносителя (воды) к теплоаккумулирующему веществу (муравьиной кислоте) для отдельного элемента аккумулятора тепловой энергии через его стенку (стекло). Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить моделирование процесса разрядки аккумулятора тепловой энергии в пакете Computational Fluid Dynamics (CFD) для получения значений нестационарного теплового потока и температуры на внешней стенке элемента аккумулятора;
- на основе расчетных температур осуществить восстановление теплового потока с помощью решения обратной задачи теплопроводности (ОЗТ) методом параметрической идентификации;
- выполнить сравнение результатов определения теплового потока, полученных в результате CFD-моделирования, и с помощью решения ОЗТ методом параметрической идентификации.

Для определения нестационарного теплового потока и температур на внешней стенке элемента осуществим моделирование процесса плавления муравьиной кислоты, используя CFD-моделирование в программе Ansys Fluent 2021 R1.

С целью оптимизации скорости расчета в ходе CFD-моделирования процессов теплообмена в аккумуляторе тепловой энергии введем следующие допущения: осесимметричная постановка задачи; поверхность эле-

мента представляет собой идеальную сферу; для описания конвективных потоков применено приближение Буссинеска [16].

В программе Ansys Fluent 2021 R1 поведение однофазной неизотермической жидкости опишем уравнениями сохранения движения, массы и энергии. Для сжимаемой жидкости уравнение сохранения массы примет следующий вид [17]:

$$\frac{dp}{d\tau} + \nabla(\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (1)$$

где ρ — плотность; τ — время; $\mathbf{v}$ — скорость.

Запишем уравнение количества движения:

$$\frac{d}{dt}(\rho \mathbf{v}) + \nabla(\rho \mathbf{v}^2) = -\nabla p + \nabla \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}, \quad (2)$$

где p — давление; $\boldsymbol{\sigma}$ — тензор напряжений; $\mathbf{g}$ — ускорение свободного падения; $\mathbf{F}$ — внешние силы.

Уравнение сохранения энергии представляет собой закон сохранения тепла для элементарной ячейки:

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\tau}(\rho E) + \nabla(\mathbf{v}(\rho E + p)) = \\ = \nabla(\lambda_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \mathbf{J}_j + (\boldsymbol{\sigma}_{eff} \mathbf{v})) + S, \end{aligned} \quad (3)$$

где $E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{\mathbf{v}^2}{2}$ — полная энергия ячейки; $h = h_i + \int_{T_i}^T c_p dT$ — удельная энтальпия ячейки за счет теплоемкости; λ_{eff} — эффективная теплопроводность среды с учетом турбулентных эффектов для жидкой фазы; $\mathbf{J}_j$ — скорость диффузионного потока; $\boldsymbol{\sigma}_{eff}$ — тензор вязких напряжений; S — источник теплоты, в том числе теплоты плавления; h_j и T — начальные значения энтальпии и среднеобъемной температуры ячейки; c_p — удельная теплоемкость.

Уравнения (1)–(3) образуют систему уравнений Навье–Стокса. Для описания конвективных эффектов используется приближение Буссинеска, особенностью которого является замена функциональной зависимости плотности от температуры в уравнениях сохранения импульса, массы и энергии на постоянную плотность, за исключением члена, отвечающего за плавучесть в уравнении импульса:

$$(\rho - \rho_0)\mathbf{g} \approx -\rho_0\beta(T - T_0)\mathbf{g},$$

где ρ_0 и T_0 — начальные значения плотности и температуры; β — коэффициент теплового расширения. Это приближение является точным, пока изменения плотности незначительны.

Энтальпия материала для каждой ячейки вычисляется как сумма теплоты фазового перехода H и теплоты h , полученной за счет теплоемкости:

$$H = h + H.$$

Теплоту фазового перехода в ячейке можно описать как произведение теплоты фазового перехода вещества L и объемной доли жидкости γ :

$$H = \gamma L.$$

Для задач фазового перехода уравнение энергии запишем в виде:

$$\frac{d}{dt}(\rho H) + \nabla(\rho \mathbf{v} H) = \nabla(\lambda_{eff} \nabla T) + S. \quad (4)$$

В результате значение температуры является следствием итерационного расчета уравнений (1), (2) и (4). Рассчитаем плотность теплового потока от теплоносителя к поверхности аккумуляторного элемента по закону Ньютона–Рихмана [18]:

$$q = \alpha(T_a - T_s),$$

где $\alpha = \frac{Nu \lambda_{eff}}{D}$ — коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к поверхности аккумуляторного элемента; $Nu = 0,825 Re^{0,62}$; $Re = D|\mathbf{v}|/\mu$; D — наружный диаметр аккумуляторного элемента; μ — кинематическая вязкость; $|\mathbf{v}|$ — модуль вектора скорости; T_a и T_s — температуры теплоносителя и внешней поверхности стеклянной колбы.

Для ромбической засыпки капсул теплоаккумулирующих веществ уравнение Нуссельта применимо при значениях критерия Рейнольдса от $2 \cdot 10^2$ до $2 \cdot 10^4$. Формулы Нуссельта для других типов засыпок приведены в работе [18].

Аккумулятор тепловой энергии, состоящий из нескольких элементов с известным начальным равномерным распределением температуры, в начальный момент времени помещается в резервуар с текущим теплоносителем постоянной температуры T_a . Начальные и граничные условия приведены в [15]. На внешней поверхности элемента задается граничное условие 3-го рода. Температура теплоносителя на входе резервуара равна 298,15 К, а коэффициент теплоотдачи от поверх-

ности элемента к теплоносителю — 390 Вт/(м²·К), значение которого для данных параметров конструкции и расхода рассчитано в работе [19]. Начальная температура аккумуляторного элемента равна 275,15 К. Теплофизические свойства стекла и муравьиной кислоты приведены в [20].

Настройки алгоритма

Для решения поставленной задачи применим алгоритм SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) [21]. Для описания фазового перехода твердое тело-жидкость используем энтальпийно-пористый подход [22], при этом константа пористой зоны равна 10^7 . Пространственную оценку градиентов вычисляемых величин опишем схемой Green–Gauss Cell Based, а градиент давления — PRESTO [21]. Для уравнений импульса и энергии зададим 2-й порядок аппроксимации. Также для поля скоростей применим невязки 10^{-5} , для энергии 10^{-6} . Шаг по времени составит 0,1 с. Расчет выполним на рабочей станции с двумя процессорами Intel® Xeon® E5–2680 v3 и 64 ГБ оперативной памяти, используя 38 потоков. Получим итоговое время расчета 9 ч 27 мин.

Увеличение скорости расчета можно получить за счет использования структурированной расчетной сетки, размер и качество которой являются параметрами, значительно влияющими на точность и скорость расчета. В качестве элементов были выбраны выпуклые четырехугольники. С целью определения оптимальной пространственной сетки проведен ряд расчетов, в которых размер ее шага уменьшается до тех пор, пока не перестанет изменяться значение теплового потока от теплоносителя к элементу и объемной доли жидкой фазы муравьиной кислоты.

Результаты CFD-моделирования

Результаты, полученные с помощью компьютерного моделирования, хорошо соотносятся с эмпирическими данными [20]. Экспериментальное время полной разрядки аккумулятора составило 33 мин, в случаях с сетками размерами 16 тыс. и 20 тыс. элементов время разрядки — 31 мин. Данные, полученные с применением расчетных сеток размером в 16 тыс. и 20 тыс. элементов, практически соответствуют друг другу. Это говорит о том, что значение в 16 тыс. элементов является оптимальным и достигает точность, сравнимую с сеткой большего размера. При этом сокращаются время расчета и объем используемой оперативной памяти.

Отметим, что приведенный в разделе «Постановка задачи и цель исследований» численный метод решения задачи позволяет подробно моделировать температурные поля внутри объекта, но его использование требует большой вычислительной мощности и, соответственно, ведет к повышению времени выполнения расчета.

Рассмотренный в работе [23] метод параметрической идентификации, позволяет существенно упростить решение в части размерности и учета гидродинамических потоков, получить решение не только прямых, но и обратных задач теплопроводности, причем не

прибегая к одношаговым итерационным методам минимизации невязки исследуемой величины. Приведенная задача теплопроводности аккумулятора тепловой энергии представляет собой задачу Стефана, описывающую изменение фазового состояния вещества с подвижной границей раздела фаз, что делает постановку задачи нелинейной. Подобного рода задачи ранее считались методом параметрической идентификации либо с постепенным изменением начальных условий для учета движения границы раздела твердого тела и текучей среды, что вызывало разбиение автоматического этапа вычислений на множество промежуточных шагов, либо с введением источника или стока тепловой энергии на крайних элементах математической модели для учета изменения внутренней энергии при фазовом переходе.

Перечисленные особенности могут быть устранены введением метода сквозного счета [24], который является перспективным направлением дальнейшего развития метода параметрической идентификации и позволяет решать задачи Стефана более эффективно с точки зрения занимаемого времени и автоматизации расчета.

Параметрическая идентификация

В общем случае решение ОЗТ методом параметрической идентификации имеет следующую особенность — минимизация функции невязки проводится итерационным одношаговым методом, требующим рассмотрение большого массива данных. Для ускорения расчетов был выбран рекуррентный фильтр Калмана, позволяющий проводить многошаговое решение. При этом тепловой поток q представляется в виде обобщенного полинома, неизвестные коэффициенты которого определяются с помощью математической модели и результатов измерений [25]:

$$q(\tau) = \sum_{j=1}^r q_j \varphi_j(\tau),$$

где $\varphi_j(\tau)$ — система базисных функций; q_j — неизвестные коэффициенты, составляющие вектор искомых параметров; r — количество разбиений временной шкалы.

В Университете ИТМО разработана программа «Heat Identification» [26], позволяющая решать ОЗТ методом параметрической идентификации с помощью классического фильтра Калмана. Решение начинается с построения дифференциально-разностной модели, которая состоит из системы однородных дифференциальных уравнений с соответствующими граничными условиями, описывающими процессы теплопереноса в исследуемом теле. Такой модели достаточно для восстановления нестационарного теплового потока в исследуемом объекте [23, 27].

Метод сквозного счета

Решение задачи Стефана методом сквозного счета заключается в том, что скачкообразно изменяющиеся теплофизические характеристики исследуемого вещества сглаживаются, что облегчает решение задачи ценой потери информации о точном нахождении границы

фазового перехода [24]. При этом решение ОЗТ в одномерных координатах сводится к решению обобщенного уравнения теплопроводности [28]:

$$(c(T) + H\delta(T - T_*)) \frac{dT}{dt} = \frac{d}{dx} \left(\lambda(T) \frac{dT}{dx} \right),$$

$$c(T) = \begin{cases} c_1, & T < T_*, \\ c_2, & T > T_*, \end{cases}$$

$$\lambda(T) = \begin{cases} \lambda_1, & T < T_*, \\ \lambda_2, & T > T_*, \end{cases}$$

где T — температура исследуемого тела; T_* — температура фазового перехода вещества; c_i — удельная теплоемкость; δ — толщина исследуемого тела; λ_i — теплопроводность вещества; i — фаза вещества (индексы: 1 — твердое тело, 2 — жидкость).

При переходе к численному решению методом сквозного счета разрывные функции сглаживаются, а функция теплоемкости содержит теплоту плавления. Тогда уравнение теплопроводности преобразуем к виду:

$$c(T, \Delta) \frac{dT}{dt} = \frac{d}{dx} \left(\lambda(T, \Delta) \frac{dT}{dx} \right),$$

$$c(T, \Delta) = \begin{cases} c_1, & T < T_* - \Delta, \\ \frac{c_1 + c_2}{2} + \frac{H}{2\Delta}, & T_* - \Delta < T < T_* + \Delta, \\ c_2, & T > T_* + \Delta, \end{cases}$$

$$\lambda(T, \Delta) = \begin{cases} \lambda_1, & T < T_* - \Delta, \\ \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}, & T_* - \Delta < T < T_* + \Delta, \\ \lambda_2, & T > T_* + \Delta, \end{cases}$$

где Δ — половина интервала сглаживания.

Отметим, что скачок значения теплоемкости стремится к бесконечности, так как теплота плавления выделяется или поглощается без изменения температуры. Применение метода сквозного счета позволило ограничить значение теплоемкости путем расширения скачка на короткий интервал изменения температуры. В работе [29] теплота фазового перехода равномерно прибавлялась к теплоемкости теплоаккумулирующего материала в некотором интервале температур. Такой подход позволял описывать линейную математическую модель, однако приводил к тяжело оцениваемым неопределенностям. Интервал температур заранее неизвестен и его необходимо было рассчитывать заново для каждой новой постановки задачи. Край этого интервала должны соответствовать экстремумам значений температуры в течение эксперимента, которые заранее неизвестны. В свою очередь, предложенный метод позволяет решать задачу Стефана с коротким интервалом сглаживания скачкообразных изменений свойств исследуемого вещества.

Подчеркнем, что решение методом сквозного счета не позволяет точно определить границу раздела фаз. Если температура в определенной точке удовлетворяет условию $T < T_*$, то тело имеет твердое агрегатное состояние, если $T > T_*$ — то жидкое. Таким образом, для

рассматриваемой задачи критерием завершения процесса разморозки является условие, что в любой точке исследуемого тела, где находится муравьиная кислота, соблюдается неравенство $T > T_*$.

Так как физическая модель имеет шаровую симметрию, решение выполнено в одномерных координатах, где $x = 0$ — центр элемента, а $x = 33$ мм — его внешняя поверхность. Разобьем модель на сферические блоки толщиной 2 мм для муравьиной кислоты и 0,5 мм для стекла. Пограничные блоки имеют толщину, равную половине от толщины соседнего блока, описывающего аналогичное вещество.

Принцип построения системы дифференциальных уравнений, описывающих теплоперенос в объекте с геометрической симметрией, представлен в работе [27]. Изменение температуры поверхности элемента во времени, которое было получено из решения CFD-моделирования, подаются на вход программы «Heat Identification». Итоговое время расчета данным методом составляет 14 мин.

В условиях реального эксперимента значения температуры принимаются по показаниям преобразователя температуры, прикрепленного на поверхность исследуемого объекта.

Результаты решения

На рис. 2 представлены результаты решения ОЗТ — восстановления нестационарного теплового потока методом параметрической идентификации и сопоставлены с решением, полученным при CFD-моделировании. Вследствие резких перепадов температур в начальный момент времени результаты определения теплового потока методом параметрической идентификации подвержены значительным колебаниям, для борьбы с которыми выходные данные были аппроксимированы В-сплайнами 1-го порядка с шириной аппроксимации 30 с.

Заключение

Рассмотрены два метода восстановления нестационарного теплового потока от хладоносителя к теплоаккумулирующему веществу для отдельного элемента

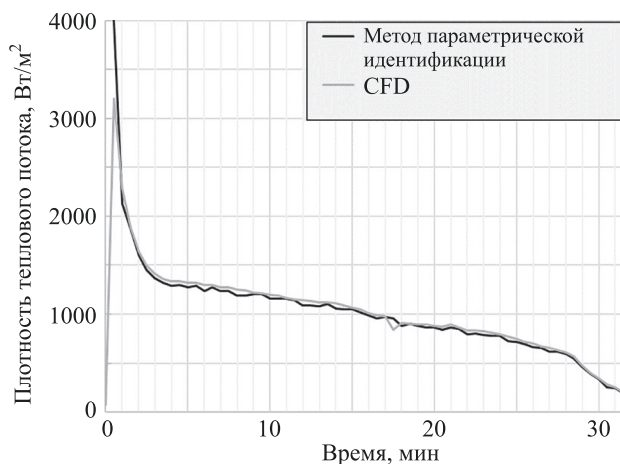


Рис. 2. Плотность нестационарного теплового потока на поверхности аккумуляторного элемента тепловой энергии

Fig. 2. Non-stationary heat flux on the surface of a thermal energy battery element

аккумулятора тепловой энергии. Первый метод — с помощью численного моделирования процесса разрядки с использованием Computational fluid dynamics пакета. Второй — путем параметрической идентификации дифференциально-разностной модели теплопереноса при решении обратной задачи теплопроводности совместно со сквозным счетом, который позволяет сглаживать скачкообразно изменяющиеся теплофизические характеристики и учитывать подвижную границу раздела фаз вещества. Предложенный метод решения обратной задачи теплопроводности значительно сокращает время восстановления граничных условий теплообмена для элемента аккумулятора с 9 ч 27 мин до 14 мин и, таким образом, существенно ускоряет процесс перебора оптимизационных параметров при проектировании и снижает требования к вычислительным мощностям. Такого результата удалось добиться благодаря тому, что метод параметрической идентификации восстанавливает тепловой поток напрямую, в отличие от других пакетов программ, которые делают это методом параметрической оптимизации. К недостаткам можно отнести работу исключительно с одномерными телами, в том числе с симметрией.

Литература

1. Sorrell S. Reducing energy demand: A review of issues, challenges and approaches // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. V. 47. P. 74–82. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.002>
2. Rahman A., Farrok O., Haque M.M. Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: Solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. V. 161. P. 112279. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112279>
3. Cirocco L., Pudney P., Riahi S., Liddle R., Semsarilar H., Hudson J., Bruno F. Thermal energy storage for industrial thermal loads and electricity demand side management // *Energy Conversion and Management*. 2022. V. 270. P. 116190. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116190>
4. Vakialtojjar S.M., Saman W. Analysis and modelling of a phase change storage system for air conditioning applications // *Applied*

References

1. Sorrell S. Reducing energy demand: A review of issues, challenges and approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, no. 47, pp. 74–82. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.002>
2. Rahman A., Farrok O., Haque M.M. Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: Solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, vol. 161, pp. 112279. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112279>
3. Cirocco L., Pudney P., Riahi S., Liddle R., Semsarilar H., Hudson J., Bruno F. Thermal energy storage for industrial thermal loads and electricity demand side management. *Energy Conversion and Management*, 2022, vol. 270, pp. 116190. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116190>
4. Vakialtojjar S.M., Saman W. Analysis and modelling of a phase change storage system for air conditioning applications. *Applied*

- Thermal Engineering, 2001. V. 21. N 3. P. 249–263. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(00\)00037-5](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(00)00037-5)
5. DNV GL. Energy Transition Outlook 2020 (A global and regional forecast to 2050). DNV GLAS Publications, 2020. P. 44–46.
6. Nada S., Alshaer W., Saleh R. Experimental investigation of PCM transient performance in free cooling of the fresh air of air conditioning systems // *Journal of Building Engineering*, 2020. V. 29. P. 101153. <https://doi.org/10.1016/j.jobeb.2019.101153>
7. Jin X., Wu F., Xu T., Huang G., Wu H., Zhou X., Wang D., Liu Y., Lai A.C. Experimental investigation of the novel melting point modified Phase–Change material for heat pump latent heat thermal energy storage application // *Energy*, 2021. V. 216. P. 119191. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119191>
8. Kasibhatla R.R., Brüggemann D. Coupled conjugate heat transfer model for melting of PCM in cylindrical capsules // *Applied Thermal Engineering*, 2021. V. 184. P. 116301. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116301>
9. 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. V. 438. N 1–2. P. 192–201. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2005.08.032>
10. Cho K., Choi S.H. Thermal characteristics of paraffin in a spherical capsule during freezing and melting processes // *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000. V. 43. N 17. P. 3183–3196. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(99\)00329-4](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(99)00329-4)
11. Benmansour A., Hamdan M.A., Benguaddach A. Experimental and numerical investigation of solid particles thermal energy storage unit // *Applied Thermal Engineering*, 2006. V. 26. N 5–6. P. 513–518. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.07.014>
12. 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. V. 19. N 3. P. 187–196. [https://doi.org/10.1016/0140-7007\(95\)00080-1](https://doi.org/10.1016/0140-7007(95)00080-1)
13. 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(79). С. 13–20. <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2021-20-2-13-20>
14. Mao Q., Cao W. Effect of variable capsule size on energy storage performances in a high-temperature three-layered packed bed system // *Energy*, 2023. V. 273. P. 127166. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127166>
15. Gao L., Dong L., Liu Z., Gegentana, Che D., Sun B. Thermal performance analysis and multi-objective optimization of thermal energy storage unit with cascaded packed bed in a solar heating system // *Applied Thermal Engineering*, 2023. V. 219. P. 119416. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119416>
16. Батуринов О.В., Морозов И.И., Рабесов И.В. Изучение гидрогазодинамических течений с помощью универсального программного комплекса Fluent: учебное пособие. Самара: СГАУ, 2007. 128 с.
17. Павловский В.А., Никущенко Д.В. Вычислительная гидродинамика. Теоретические основы: учебное пособие. СПб.: Издательство «Лань», 2018. 368 с.
18. Деменок С.Л., Медведев В.В., Сивуха С.М. Гидродинамика и теплообмен в шаровых укладках: монография. СПб.: Страта, 2012. 192 с.
19. Кузнецов П.А. Повышение эффективности систем кондиционирования воздуха на основе аккумулирования низкотемпературной энергии: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. СПб.: Университет ИТМО, 2021 [Электронный ресурс]. URL: <https://dissovet.itmo.ru/dissertation/?number=461692>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 17.02.2024).
20. Захарова В.Ю., Файзуллин Р.О., Бараненко А.В., Калимжанов Д. Численные и экспериментальные исследования фазовых переходов муравьиной кислоты как теплоаккумулирующего вещества // *X Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке»* (Санкт-Петербург, 27–29 октября 2021 г.): материалы конференции. 2021. С. 176–181.
21. Patanka S. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Washington, DC: CRC Press, 1980. 214 p. <https://doi.org/10.1201/9781482234213>
22. Priyanshu G., Dutta A., Verma V., Thangamani I. Enthalpy porosity method for CFD simulation of natural convection phenomenon for phase change problems in the molten pool and its importance during melting of solids. *Proc. of the COMSOL Conference in Bangalore*, 2013.
23. Piliipenko N.V. Uncertainty of non-stationary heat flux recovery by parametric identification of differential-difference model of heat transmission. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, vol. 60, no. 7, P. 249–263. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(00\)00037-5](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(00)00037-5)
5. DNV GL. Energy Transition Outlook 2020 (A global and regional forecast to 2050). DNV GLAS Publications, 2020, pp. 44–46.
6. Nada S., Alshaer W., Saleh R. Experimental investigation of PCM transient performance in free cooling of the fresh air of air conditioning systems. *Journal of Building Engineering*, 2020, vol. 29, pp. 101153. <https://doi.org/10.1016/j.jobeb.2019.101153>
7. Jin X., Wu F., Xu T., Huang G., Wu H., Zhou X., Wang D., Liu Y., Lai A.C. Experimental investigation of the novel melting point modified Phase–Change material for heat pump latent heat thermal energy storage application. *Energy*, 2021, vol. 216, pp. 119191. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119191>
8. Kasibhatla R.R., Brüggemann D. Coupled conjugate heat transfer model for melting of PCM in cylindrical capsules. *Applied Thermal Engineering*, 2021, vol. 184, pp. 116301. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116301>
9. 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, pp. 192–201. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2005.08.032>
10. Cho K., Choi S.H. Thermal characteristics of paraffin in a spherical capsule during freezing and melting processes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, vol. 43, no. 17, pp. 3183–3196. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(99\)00329-4](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(99)00329-4)
11. Benmansour A., Hamdan M.A., Benguaddach A. Experimental and numerical investigation of solid particles thermal energy storage unit. *Applied Thermal Engineering*, 2006, vol. 26, no. 5–6, pp. 513–518. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.07.014>
12. 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, pp. 187–196. [https://doi.org/10.1016/0140-7007\(95\)00080-1](https://doi.org/10.1016/0140-7007(95)00080-1)
13. 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(79), pp. 13–20. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2021-20-2-13-20>
14. Mao Q., Cao W. Effect of variable capsule size on energy storage performances in a high-temperature three-layered packed bed system. *Energy*, 2023, vol. 273, pp. 127166. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127166>
15. Gao L., Dong L., Liu Z., Gegentana, Che D., Sun B. Thermal performance analysis and multi-objective optimization of thermal energy storage unit with cascaded packed bed in a solar heating system. *Applied Thermal Engineering*, 2023, vol. 219, pp. 119416. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119416>
16. Baturin O.V., Morozov I.I., Rabkesov I.V. *Studying Hydrogasdynamic Flows Using the Universal Software Package Fluent*. Samara, Samara University, 2007, 128 p. (in Russian)
17. Pavlovskii V.A., Nikushchenko D.V. *Computational hydrodynamics. Theoretical foundations*. St. Petersburg, Lan’ Publ., 2018, 368 p. (in Russian)
18. Demenok S.L., Medvedev V.V., Sivukha S.M. *Hydrodynamics and Heat Transfer in Spherical Packings*. St. Petersburg, Strata Publ., 2012, 192 p. (in Russian)
19. Kuznetsov P.A. *Increasing the efficiency of air conditioning systems based on low-temperature energy storage*. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. St. Petersburg, ITMO University, 2021. Available at: <https://dissovet.itmo.ru/dissertation/?number=461692> (accessed: 17.02.2024). (in Russian)
20. Zakharova V.Iu., Faizullin R.O., Baranenko A.V., Kalimzhanov D. Numerical and experimental studies of formic acid phase transitions as a heat-accumulating substance. *Proc. of the X International Scientific and Technical Conference “Low-Temperature and food Technologies in the 21st Century”*, 2021, pp. 176–181. (in Russian)
21. Patanka S. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Washington, DC: CRC Press, 1980. 214 p. <https://doi.org/10.1201/9781482234213>
22. Priyanshu G., Dutta A., Verma V., Thangamani I. Enthalpy porosity method for CFD simulation of natural convection phenomenon for phase change problems in the molten pool and its importance during melting of solids. *Proc. of the COMSOL Conference in Bangalore*, 2013.
23. Piliipenko N.V. Uncertainty of non-stationary heat flux recovery by parametric identification of differential-difference model of heat transmission. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, vol. 60, no. 7,

- melting of solids // Proc. of the COMSOL Conference in Bangalore, 2013.
23. Пилипенко Н.В. Неопределенность восстановления нестационарного теплового потока путем параметрической идентификации дифференциально-разностных моделей теплопереноса // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 7. С. 664–671. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2017-60-7-664-671>
 24. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1965. Т. 5. № 5. С. 816–827.
 25. Пилипенко Н.В., Заричняк Ю.П., Иванов В.А., Халыavin А.М. Параметрическая идентификация дифференциально-разностных моделей теплопереноса в одномерных телах на основе алгоритмов фильтра Калмана // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 4. С. 584–588. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-4-584-588>
 26. Кириллов К.В., Пилипенко Н.В. Алгоритмы программ для решения прямых и обратных задач теплопроводности при использовании дифференциально-разностных моделей // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2010. № 5(69). С. 106–109.
 27. Пилипенко Н.В., Колодийчук П.А., Заричняк Ю.П. Дифференциально-разностная модель теплопереноса в твердых телах с использованием метода параметрической идентификации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22. № 6. С. 1237–1240. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-6-1237-1240>
 28. Курбатова Г.И. О расчете оледенения поверхностей в морской воде // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2018. Т. 14. № 3. С. 186–199. <https://doi.org/10.21638/11702/spbu10.2018.301>
 29. Дружинин П.В., Коричев А.А., Косенков И.А., Юрчик Е.Ю. Математическая модель процесса разрядки теплового аккумулятора фазового перехода // Техно-технологические проблемы сервиса. 2009. № 4(10). С. 17–22.
 30. pp. 664–671. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2017-60-7-664-671>
 24. Samarskii A.A., Moiseyenko B.D. An economic continuous calculation scheme for the stefan multidimensional problem. *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 1965, vol. 5, no. 5, pp. 43–58. [https://doi.org/10.1016/0041-5553\(65\)90004-2](https://doi.org/10.1016/0041-5553(65)90004-2)
 25. Pilipenko N.V., Zarichnyak Yu.P., Ivanov V.A., Khalyavin A.M. Parametric identification of differential-difference models of heat transfer in one-dimensional bodies based on Kalman filter algorithms. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 584–588. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-4-584-588>
 26. Kirillov K., Pilipenko N. Solution algorithms for direct and backward heat conductivity problems by means of differential-difference models. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2010, no. 5(69), pp. 106–109. (in Russian)
 27. Pilipenko N.V., Kolodiychuk P.A., Zarichnyak Yu.P. Differential-difference model of heat transfer in solids using the method of parametric identification. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 6, pp. 1237–1240. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-6-1237-1240>
 28. Kurbatova G.I. On the calculation of surfaces glaciation in seawater. Vestnik of Saint Petersburg University. *Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, 2018, vol. 14, no. 3, pp. 186–199. (in Russian). <https://doi.org/10.21638/11702/spbu10.2018.301>
 29. Druzhinin P.V., Korichev A.A., Kosenkov I.A., Iurchik E.Iu. Mathematical model of the process of discharging a phase transition thermal accumulator. *Tekhniko-tehnologicheskie problemy servisa*, 2009, no. 4(10), pp. 17–22. (in Russian)

Авторы

Пилипенко Николай Васильевич — доктор технических наук, профессор, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 7006938207](https://orcid.org/0000-0001-9328-3166), <https://orcid.org/0000-0001-9328-3166>, pilipenko38@mail.ru

Колодийчук Павел Андреевич — ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 58038475100](https://orcid.org/0000-0002-9984-1613), <https://orcid.org/0000-0002-9984-1613>, pkolodiychuk@itmo.ru

Захарова Виктория Юрьевна — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57216971647](https://orcid.org/0000-0002-8554-3260), <https://orcid.org/0000-0002-8554-3260>, vizakharova@itmo.ru

Файзуллин Рафаэль Олегович — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57216968372](https://orcid.org/0000-0002-3045-4447), <https://orcid.org/0000-0002-3045-4447>, rofaizullin@itmo.ru

Authors

Nikolai V. Pilipenko — D.Sc, Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 7006938207](https://orcid.org/0000-0001-9328-3166), <https://orcid.org/0000-0001-9328-3166>, pilipenko38@mail.ru

Pavel A. Kolodiychuk — Asistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 58038475100](https://orcid.org/0000-0002-9984-1613), <https://orcid.org/0000-0002-9984-1613>, pkolodiychuk@itmo.ru

Victoria Yu. Zakharova — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57216971647](https://orcid.org/0000-0002-8554-3260), <https://orcid.org/0000-0002-8554-3260>, vizakharova@itmo.ru

Rafael O. Faizullin — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57216968372](https://orcid.org/0000-0002-3045-4447), <https://orcid.org/0000-0002-3045-4447>, rofaizullin@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 19.01.2024

Одобрена после рецензирования 01.04.2024

Принята к печати 16.05.2024

Received 19.01.2024

Approved after reviewing 01.04.2024

Accepted 16.05.2024



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»