УДК 536.21
DOI: 10.34031/ES.2026.3.07

Секция
Теплоэнергетика и теплотехника

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИСТОЧНИКОВ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ НА ТОЧНОСТЬ АЛГОРИТМА КОСВЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В МНОГОСЛОЙНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ

Чадаев А.Н.[1], Дмитриев А.В.[2], Биккулов Р.Я.[2]

[1] Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия
[2] Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Аннотация

Разработка тепловых режимов современных высокотемпературных тепловых агрегатов требует замеров температур, значительно превышающих 800°С, а также усложняется существенной зависимостью теплопроводности теплоизоляционных материалов от температуры. Стандартные термопары не рассчитаны на такие режимы работы. Теплопроводность теплоизоляционных материалов в диапазоне температур 500 – 2000°С и выше является не постоянной величиной, а имеет квадратичную зависимость от температуры и сильно зависящую от состава вещества. Целью работы является алгоритм, позволяющий по показаниям нескольких термопар внутри слоя теплоизоляции ближе к ее холодной стороне предсказать температуру на горячей стороне теплоизоляции, а также оценить влияние погрешностей заглубления термопар и погрешность измерения ими температур на точность предсказания. Для достижения цели был выбран эволюционный стохастический метод и разработан генетический алгоритм. Он был испытан на двух образцах теплоизоляции. Им была предсказана температура 2073 и 2064 К при эталонном значении 2000 К. Наибольший вклад в погрешность предсказания вносит точность монтажа термопар ±1, умеренный вклад вносит погрешность измерения термопарами ±3°С, наименьший вклад вносит стохастичность алгоритма. Суммарная погрешность значительно ниже суммы всех погрешностей.

Ключевые слова: *теплопроводность, обратная задача, дифференциальная эволюция, многослойная изоляция, анализ неопределённостей, корундовый огнеупор, температурный профиль, термопара*

COMPARATIVE ANALYSIS OF UNCERTAINTY SOURCES' INFLUENCE ON ACCURACY OF INDIRECT TEMPERATURE FIELD DETERMINATION ALGORITHM IN MULTILAYER THERMAL INSULATION

Aleksey Chadaev [1], Andrey Dmitriev [2], Rustem Bikkulov [2]

[1] Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia
[2] Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Abstract

Developing thermal operating conditions for modern high-temperature thermal units requires temperature measurements well above 800°C; furthermore, the task is complicated by the fact that the thermal conductivity of thermal insulation materials is highly temperature-dependent. Standard thermocouples are not designed for such operating conditions. In the temperature range of 500–2000°C and above, the thermal conductivity of insulation materials is not a constant value; rather, it follows a quadratic dependence on temperature and is strongly influenced by the material's composition. The objective of this work is to develop an algorithm that uses readings from several thermocouples—placed within the insulation layer, closer to its cold side—to predict the temperature on the hot side. The study also evaluates how errors in thermocouple placement and measurement inaccuracies affect the precision of these predictions. To achieve this, an evolutionary sto-

chastic approach was adopted, and a genetic algorithm was developed. The algorithm was tested on two insulation samples, yielding predicted temperatures of 2073 and 2064 K, compared to a reference value of 2000 K. The greatest contribution to the prediction error comes from the precision of the thermocouple installation (±1 unit), followed by a moderate contribution from thermocouple measurement error (±3°C), while the stochastic nature of the algorithm contributes the least. The total cumulative error is significantly lower than the sum of the individual error components.

Keywords: *thermal conductivity, inverse problem, differential evolution, multilayer insulation, uncertainty analysis, corundum refractory, temperature profile, thermocouple*

Введение

В настоящее время в период бурного развития «зеленой энергетики», период осознания человечеством конечности запасов углеводородов все большее значение начинает приниматься экономное их расходование, а также получение солнечной энергии, энергии ветра и воды. Все эти процессы так или иначе требуют технологии накопления энергии, важнейшим аспектов которой является разработка новых высокоэффективных теплоизоляционных материалов, выдерживающих высокие температуры более 1000°С. Теплоизоляция, выдерживающая многократные циклы нагрева-охлаждения напрямую влияет на надежность тепловых аккумуляторов, применяющихся во все боле широком диапазоне отраслей промышленности, таких как металлургия, химическая промышленность, солнечная энергетика и промышленная теплотехника. В свою очередь важнейшим критерием надежности является правильно рассчитанный тепловой режим [1]. Одним из перспективных теплоизоляционных материалов, являются ультралёгкие корундовые огнеупоры на основе полых сфер. Они сочетают в себе множество полезных свойств, таких как легкость, низкая теплопроводность, механическую прочность и огнеупорность [2].

Для проектирования и разработки высокотемпературных устройств требуется наличие большого количества достоверных данных о теплофизических свойствах материалов в широком диапазоне температур. Получение таких данных для температур свыше 1500К связано с трудностями обеспечения учета лучистого переноса, окисления и коррозии веществ, замером температур и других свойств веществ [2]. Методом монотонного нагрева получены данные тепло- и температуропроводности корундовых огнеупоров в среде различных газов (гелий, азот, разрежённый воздух) при температурах 500-2000 К. Показано, что при температурах выше 1000 К преобладает лучистый теплообмен. Современные нестационарные методы, например метод импульсного нагрева зонда, имеют ограничения, такие как умеренные температуры и малый объемами исследуемых образцов [3]. Также известны подходы, предложенные в работе [4], заключающиеся в стационарном нагреве в вакууме до 2000 °С с последующим замером теплопроводности с помощью инфракрасной пирометрии, что позволяет исследовать тугоплавкие материалы, такие как графит, карбиды, и др. без непосредственного контакта датчиков с образцом.

Согласно справочнику Чиркина [5] теплопроводность теплоизоляционных материалов в широком диапазоне температур вплоть до 2000°С и выше имеет квадратичную зависимость от температуры вида $\lambda(T) = a + bT + cT^2$. Это позволяет более точно рассчитывать тепловые процессы, происходящие в тепловых агрегатах. Но с другой стороны это усложняет многие их расчеты, потому что температурное поле описывается кубическим уравнением относительно координаты.

Одним из инструментов определения теплофизических свойств веществ, температурных полей и граничных условий по ограниченному набору экспериментальных данных являются обратные задачи теплопроводности. В обзоре [6] описан ряд чис-

ленных методов решений таких задач: метод сопряженных градиентов, метод последовательной спецификации функций, граничных элементов, конечных разностей. Также рассматриваются подходы на основе регуляризации Тихонова и метода фундаментальных решений. Они применяются для мониторинга состояния доменных печей, кажущейся теплопроводности вспучивающихся огнезащитных покрытий, определения локальных тепловых потоков в пульсирующих тепловых трубах и оптимизации пусковых режимов энергоблоков. Отмечается, что решение ОЗТ для материалов с нелинейными параметрами теплопроводности требует больших вычислительных ресурсов и методов глобальной оптимизации.

Несмотря на значительное число работ, посвященных решению ОЗТ, вопрос влияния на результат различных источников неопределенности, таких как стохастичность эволюционных алгоритмов, погрешность измерения температуры термопарами, и погрешность определения места установки, остается не до конца изученным.

Целью настоящей работы является сравнительный анализ влияния трёх основных источников неопределённости — стохастичности генетического алгоритма дифференциальной эволюции, погрешности измерения температуры термопарами (±3 °C) и погрешности установки датчиков по глубине (±1 мм) — на точность косвенного определения температуры горячей границы в двухслойной высокотемпературной теплоизоляции из корундового огнеупора на основе полых сфер. Верификация алгоритма производится с помощью эталонного температурного профиля, построенного аналитическим решением прямой задачи теплопроводности для двух модификаций материала с различным газонаполнением пор [2].

Материалы и методы (Materials and Methods)

Объектом исследования является высокотемпературная двухслойная теплоизоляция промышленного оборудования, состоящая из рабочего высокотемпературного слоя корундового огнеупора на основе полых сфер и внешнего низкотемпературного слоя, выполненного, например, из минеральной ваты. В работе выдвигается гипотеза о том, что параметры нелинейной зависимости теплопроводности $\lambda(T)=a+bT+cT^2$ и температура на недоступной для прямого измерения горячей границе (T_{hot}) могут быть достоверно восстановлены по ограниченному набору температурных измерений термопарами в холодной зоне слоя, схематично показанного на рис. 1, с помощью стохастических методов глобальной оптимизации, даже при наличии инструментальных шумов и геометрических неопределенностей.

Для верификации алгоритма используются эталонные температурные профили и табличные данные теплопроводности для двух модификаций корундового огнеупора, полученные аналитическим методом решения прямой задачи теплопроводности [7]. Образец №1 представляет собой материал с полостями, заполненными азотом при атмосферном давлении; образец №2 — материал с полостями, заполненными воздухом при давлении 130 Па. Подробное математическое описание методики построения эталонных профилей, включая решение кубического уравнения методом Кардано и процедуру верификации корней, приведено в работе [7] и в рамках данной статьи не дублируется.

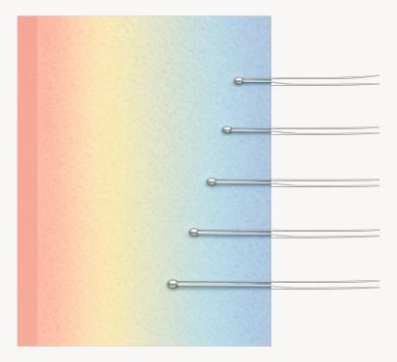


Рис. 1. Схема расположения термопар на разной глубине в вертикальном слое теплоизоляции
Цветовым градиентом показан градиент температур от горячей стороны (слева) к холодной (справа)

Постановка задачи

Рассмотрен процесс установившейся одномерной теплопередачи через плоский слой теплоизоляции толщиной δ без внутренних источников теплоты. Материал слоя изоляции обладает однородной структурой, с теплопроводностью, зависящей от температуры (К) и описывается квадратичной зависимостью $\lambda(T) = a + b \cdot T + c \cdot T^2$. Коэффициенты a, b, c являются неизвестными величинами. Система рассматривается при условии, что на холодной границе ($x = \delta$) высокотемпературного слоя температура известная T_c. Также известны 5 температур в слое теплоизоляции ближе к ее холодной стороне и 5 соответствующих глубин, на которых эта температура была измерена. На холодной границе ($x = \delta$) осуществляется теплообмен теплопроводностью и лучистый с низкотемпературным слоем теплоизоляции, который в свою очередь осуществляет конвективный теплообмен с окружающей средой с температурой T_{env} и коэффициентом теплоотдачи α.

Запишем уравнение теплопроводности для слоя теплоизоляции без внутренних источников теплоты в случае одномерного стационарного распространения теплоты:

$$\frac{d}{dx}\left[\lambda(T)\frac{dT}{dx}\right] = 0. \quad (1)$$

Интегрирование данного выражения приводит к тому, что плотность теплового потока q остается постоянной по толщине слоя:

$$\lambda(T)\frac{dT}{dx} = -q. \quad (2)$$

Используя закон Ньютона-Рихмана для граничного условия и разделив переменные, можно установить связь между тепловым потоком и температурой на холодной границе T_c, тогда имеем:

$$\int_{T_h}^{T_c} \lambda(T)dT = -q\delta. \quad (3)$$

Подставив в полученное уравнение зависимость теплопроводности и выражение для определения плотности теплового потока, имеем уравнение вида:

$$a\left(T_c - T_{hot}\right) + \frac{b}{2}\left(T_c^2 - T_{hot}^2\right) + \frac{c}{3}\left(T_c^3 - T_{hot}^3\right) - q\delta = 0. \quad (4)$$

В качестве первичных преобразователей выбраны термопары типа ТХА (хромель-алюмель), обеспечивающие длительную эксплуатацию до 1100 °С. Инструментальная погрешность измерения температуры принята равной ±3 °С в соответствии с ГОСТ Р 8.585-2001. Погрешность определения координаты установки датчиков (глубины заглубления) составляет ±1 мм, что соответствует реальным технологическим допускам монтажа футеровки.

Измерение температур производится с помощью 6 термопар, одна из которых находится на поверхности ее холодной стороны, а остальные в слое теплоизоляции на разной ее глубине, но ближе к холодной стороне. Такое количество термопар обусловлено необходимостью снижения их влияния на конструкцию изоляции и минимизации тепловых мостиков, при этом сохранена достаточная избыточность данных для идентификации 5 неизвестных параметров модели *(a, b, c, T_{hot}, q)*. Задача является одномерной и началом отсчета координаты x термопар принята горячая сторона теплоизоляции с положительным направлением оси x в сторону холодной стороны. Термопары расположены равномерно в диапазоне $x \in [0{,}146;\ 0{,}200]$ м, то есть ближе к холодной

границе. Эталонный расчет выполнен с шагом дискретизации 0,01 м при толщине изоляции δ = 0,2 м. Истинная температура на горячей стороне для обоих образцов составляет 2000 К (1727 °С).

Методика решения обратной задачи

Идентификация параметров осуществляется путем минимизации суммы квадратов невязок между измеренными и расчетными температурами. Поскольку задача является нелинейной и многоэкстремальной, применение градиентных методов не гарантирует нахождение глобального минимума. В связи с этим используется генетический алгоритм дифференциальной эволюции (*Differential Evolution, DE*) со стратегией *rand1bin*, которая показала наилучшую сходимость для данного класса задач. Локальная оптимизация (*SLSQP*) применена на втором этапе. Блок-схема работы алгоритма представлена на рис. 2.

Поиск ведется в физически обоснованных границах, полученных изучением теплопроводности нескольких образцов высокотемпературной теплоизоляции в зависимости от температуры:

1. $a \in [0{,}01;1{,}0]$,
2. $b \in [-5\cdot10^{-3}; 2\cdot10^{-4}]$,
3. $c \in [5\cdot10^{-9}; 5\cdot10^{-7}]$,
4. $T_{hot} \in [1500;2500]$ К,
5. $q \in [500; 5000]$ Вт/м^2.

Размер популяции составляет 20 особей, максимальное число поколений — 300, толерантность сходимости — 10^{-10}. Начальное зерно генератора псевдослучайных чисел (*seed*) не фиксируется для оценки стохастической устойчивости метода.



Рис. 2. Блок-схема решения обратной задачи теплопроводности
Результатом её реализации являются параметры теплопроводности, температуры и теплового потока для заданного материала теплоизоляции

Для проверки гипотезы и сравнительного анализа источников неопределенности сформировано четыре сценария моделирования, каждый из которых воспроизведен в 30 независимых запусках:

1) варьирование только *seed* при эталонных входных данных (оценка внутренней стохастичности алгоритма);

2) варьирование только температуры ±3 К (оценка влияния приборной погрешности);

3) варьирование только координаты заглубления термопары ±1 мм (оценка влияния монтажной погрешности);

4) совместное действие всех трех упомянутых выше факторов (оценка в реальных условиях).

Статистическая обработка включала расчет математического ожидания, дисперсии, среднеквадратичного отклонения и проверку нормальности распределения результатов по критерию Шапиро – Уилка (α = 0,05). Сравнение проводилось относительно эталонного значения T_{hot} = 2000 К.

Данный сценарий моделирования был воспроизведен для каждого из двух образцов теплоизоляции. Итого было произведено 120 запусков для каждого образца.

Результаты (Results)

Для общей оценки точности предсказания температуры горячей поверхности теплоизоляции при совместном влиянии стохастичности алгоритма, погрешности измерения температуры ±3 К и заглубления термопар ±1 мм, параметры оценки нормальности распределения статистических данных результаты экспериментов были сведены в табл. 1.

Таблица 1

Статистические параметры точности предсказания T_{hot} каждого из образцов

№ образца	Среднее T_{hot}, К	Среднеквадратическое отклонение T_{hot}, К	Статистика W / критическое W (при α = 0,05)	p-уровень	Нормальность распределения
1	2073	98	0,963 / 0,93	0,371	Да
2	2064	102	0,98 / 0,93	0,818	Да

Для оценки влияния стохастичности алгоритма, погрешности измерения температуры термопарами и погрешностей их установки в общую точность предсказания температуры результаты экспериментов были сведены в табл. 2 и 3

Таблица 2

Факторы и их влияние на общую точность предсказания T_{hot} для образца №1

Фактор	Среднее T_{hot} , К	Среднеквадратическое отклонение T_{hot}, К
Стохастичность алгоритма	2091	65
Точность измерения температуры	2069	78
Точность установки термопары	2080	90
Все вышеперечисленные	2073	98

Таблица 3

Факторы и их влияние на общую точность предсказания T_{hot} для образца №2

Фактор	Среднее T_{hot} , К	Среднеквадратическое отклонение T_{hot}, К
Стохастичность алгоритма	2109	59
Точность измерения температуры	2099	64
Точность установки термопары	2147	122
Все вышеперечисленные	2064	102

Обсуждение (Discussion)

С помощью критерия Шапиро-Уилка установлено, что предсказанные температуры распределены нормально. Это позволяет использовать коэффициент Стьюдента для нахождения доверительных интервалов с заданным уровнем надежности.

Для обоих образцов наблюдается завышение средней предсказанной температуры на 73 и 64К или 3,7 и 3,2% для первого и второго образцов соответственно, что позволяет судить о завышении прогноза и возможных путях усовершенствования алгоритма, либо введения поправочных коэффициентов.

Погрешность установки термопары является доминирующим источником неопределенности по отношению к ее точности измерения. Также можно заметить, суммарное влияние всех трех неопределённостей не является их арифметической суммой, а является значительно меньшей величиной. Это объясняется взаимной компенсацией неточностей и нелинейностью кубического уравнения.

Практические рекомендации:

1. Точность установки термопар является критическим фактором. Необходимо обеспечить точность ±0.5 мм. Это может потребовать специальных монтажных приспособлений.

2. Термопары с погрешностью ±3 К вносят умеренный вклад во внесение неопределенности. Более дорогие и точные термопары не требуются.

3. Систематическое смещение предсказанной температуры в сторону более высоких значений может потребовать введения поправочных коэффициентов.

Выводы (Conclusion)

Подтверждена гипотеза о возможности достоверно восстановить 5 неизвестных параметров модели (a, b, c, T_{hot}, q) по 6-ти точкам измерения температуры ближе к холодной стороне высокотемпературного слоя теплоизоляции. Генетический алгоритм на основе дифференциальной эволюции со стратегией *rand1bin* обеспечивает предсказание температуры на горячей границе со среднеквадратическим отклонением 98 К для первого образца и 102 К для второго образца при эталонном значении 2000 К, что составляет 4,9 и 5,1% соответственно.

Распределение предсказанных температур по результатам 30 независимых запусков для каждого из образцов является нормальным, что подтверждается рассчитанным коэффициентом Шапро-Уилка.

Установлена степень влияния каждого фактора неопределенности на предсказание температуры. Наибольший вклад вносит неопределенность, обусловленная неточностью установки термопары ±1. Умеренный вклад вносит погрешность измерения температуры термопарой ±3 К. Наименьший вклад вносится стохастичностью генетического алгоритма.

Выявлен эффект нелинейного влияния друг на друга всех трех источников неопределенностей: стохастичности алгоритма, погрешности заглубления термопар и погрешности измерения ими температур. Суммарная погрешность значительно ниже суммы всех погрешностей. Это объясняется взаимной компенсацией погрешностей и физическими ограничениями на значения пяти оптимизируемых параметров.

Для обоих образцов выявлено систематическое положительное смещение предсказания относительно эталонной температуры: +73 К (3,7 %) для первого образца и +64 К (3,2 %) для второго. Оно может быть скомпенсировано введением поправочных коэффициентов.

Научная новизна заключается в проведённом количественном сравнительном анализе вклада стохастичности эволюционного алгоритма, погрешности замера температуры термопарой и погрешности монтажа термопар в суммарную неопределённость решения обратной задачи теплопроводности с квадратичной зависимостью теплопроводности от температуры, а также в обнаружении и объяснении эффекта нелинейного сжатия среднеквадратичного отклонения при совместном воздействии источников шума.

Практическая значимость состоит в получении обоснованных требований к точности монтажа термопар (не хуже ±0.5 мм для обеспечения СКО<100 К) и подтверждении достаточности погрешности термопар ±3 °C.

Информация о финансировании (Acknowledgments)

Работа выполнена в рамках гранта Академии Наук Республики Татарстан на поддержку программ развития передовых инженерных школ республиканского значения «ТурбоПИШ», соглашение 1РПИШ от 19.12.2025 г.

Библиографический список

1. Selection of materials for high temperature sensible energy storage / **S. Khare, M. Dell'Amico, C. Knight, S. Mcgarry** // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2013. – Vol. 115. – P. 114-122. DOI: 10.1016/j.solmat.2013.03.009.

2. Тепло- и температуропроводность корундовых огнеупоров на основе полых сфер в интервале температур 500– 2000 К в различных газовых средах / **С.Л. Бондаренко, Е.Я. Литовский, А.Б. Иванов** и др. // Теплофизика высоких температур. – 1986. – Том 24, № 3. – С. 618–619.

3. Экспериментальная установка для измерения теплопроводности жидкостей, газов и твердых тел методом импульсного нагрева / **Ф.Р. Габитов, И.Р. Габитов, Л.Ю Яруллин** др. // Приборы и техника эксперимента. – 2025. – Том 2, № 2. – С. 145–151. EDN: GLLPNL. DOI: 10.7868/s3034564225020191.
Переводная версия :
Experimental setup for measuring thermal conductivity of liquids, gases, and solids by the pulse heating method / F.R. Gabitov, I.R. Gabitov, L.Y Yarullin et al // Instruments and Experimental Techniques. – 2025. – Vol 68(2). – P. 332-337. EDN: TUJGRG. DOI: 10.1134/S0020441225700319.

4. A steady-state high-temperature method for measuring thermal conductivity of refractory materials / **M. Manzolaro, S. Corradetti, A. Andrighetto, L. Ferrari** // Review of Scientific Instruments. – 2013. – Vol. 84(5). – P. 054902. DOI: 10.1063/1.4804258.

5. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. – М.: Атомиздат, 1968. – 484 p.

6. Томочаков М.М., Березовская И.Э. Анализ современного состояния решения обратных задач теплопроводности и их применения // Universum: Технические науки. – 2022. – № 5-3(98). – С. 39-44. EDN: MWAZYN. DOI: 10.32743/UniTech.2022.98.5.13591

7. Методика построения температурного профиля в плоском слое теплоизоляции с нелинейной зависимостью теплопроводности от температуры / **А.Н. Чадаев, А.В. Дмитриев, Р.Я. Биккулов, О.С. Дмитриева** // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2026. – Том 12, Вып. 2 (46). – С. 6-19. EDN: CNNBPG. DOI: 10.21684/2411-7978-2026-12-2-6-19.

References

1. Khare, S., Dell'Amico, M., Knight, C., & McGarry, S. (2013). Selection of materials for high temperature sensible energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells, 115*, 114–122. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.03.015

2. Bondarenko, S. L., Litovsky, E. Ya., Ivanov, A. B., & Borovetskaya, A. I. (1986). Teplo- i temperaturoprovodnost' korundovykh ogneuporov na osnove polykh sfer v intervale temperatur 500–2000 K v razlichnykh gazovykh sredakh [Heat and thermal diffusivity of corundum refractories based on hollow spheres in the temperature range of 500–2000 K in various gas environments]. *Teplofizika Vysokikh Temperatur, 24(3)*, 618–619. [In Russian]

3. Gabitov, F. R., Gabitov, I. R., Yarullin, L. Yu., Khairutdinov, V. F., Khabriev, I. Sh., & Abdulagatov, I. M. (2025). Experimental setup for measuring thermal conductivity of liquids, gases, and solids by the pulse heating method. *Instruments and Experimental Techniques, 68(2)*, 332-337. https://doi.org/10.1134/S002044122 5700319

4. Manzolaro, M., Corradetti, S., Andrighetto, A., & Ferrari, L. (2013). A steady-state high-temperature method for measuring thermal conductivity of refractory materials. *Review of Scientific Instruments*, *84(5)*, 054902. https://doi.org/10.1063/1.4804258
5. Chirkin, V. S. (1968). *Teplofizicheskie svoystva materialov yadernoy tekhniki* [*Thermophysical properties of nuclear engineering materials].* Atomizdat. [In Russian]
6. Tomochakov, M. M., & Berezovskaya, I. E. (2022). Analysis of the current state of the solution of inverse thermal conductivity problems and their application. *Universum: Tekhnicheskie Nauki, 5(98)*, 39-44. [In Russian]
7. Chadaev, A. N., Dmitriev, A. V., Bikkulov, R. Y., & Dmitrieva, O. S. (2026). The methodology for constructing a temperature profile in a flat insulation layer with a nonlinear dependence of thermal conductivity on temperature. *Tyumen State University herald. Physical and mathematical modeling. Oil, gas, energy, 12(2)*, 6–19. https://doi.org/10.21684/2411-7978-2026-12-2-6-19 [In Russian]

Сведения об авторах

Чадаев Алексей Николаевич, аспирант, кафедра оборудования пищевых производств, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия e-mail: ac312@mail.ru, SPIN-код: 1497-4123, ORCID 0009-0004-3180-5933.

Дмитриев Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств, Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия, e-mail: ieremiada@gmail.com, SPIN-код: 2980-2531, ORCID 0000-0001-8979-4457.

Биккулов Рустем Ядкарович, кандидат технических наук, преподаватель, кафедра инженерной графики, Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия e-mail: bikkulov-ry@mail.ru, AuthorID: 154038, ORCID 0000-0003-4783-147X.

Authors about

Aleksey Chadaev, Postgraduate Student, Department of Food Production Equipment, Kazan National Research Technological University, e-mail: ac312@mail.ru, ORCID 0009-0004-3180-5933.

Andrey Dmitriev, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Head of the Department of Automation of Technological Processes and Productions, Kazan State Power Engineering University, e-mail: ieremiada@gmail.com, ORCID 0000-0001-8979-4457.

Rustem Bikkulov, Cand. Sci. (Tech.), Lecturer, Department of Engineering Graphics, Kazan State Power Engineering University, e-mail: bikkulov-ry@mail.ru, ORCID 0000-0003-4783-147X.

Ссылки для цитирования

Чадаев А.Н., Дмитриев А.В., Биккулов Р.Я. Сравнительный анализ влияния источников неопределённости на точность алгоритма косвенного определения температурных полей в многослойной теплоизоляции // Энергетические системы. – 2026. – № 3. – С. 63-71.

Chadaev, A., Dmitriev, A., & Bikkulov, R. (2026). Comparative analysis of uncertainty sources' influence on accuracy of indirect temperature field determination algorithm in multilayer thermal insulation. *Energy Systems, 3*, 63-71. https://doi.org/10.34031/es.2026.3.07