
Научная статья

УДК 66.045.3

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-203-214

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ФРОНТА ЧЕРЕЗ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ И СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТА МОДЕЛИРОВАНИЯ С РЕЗУЛЬТАТОМ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛА В УСЛОВИЯХ ОДНОСТОРОННЕГО НАГРЕВА

В.В. Бутаков¹, А.А. Луговой¹, В.Г. Бабашов¹, А.В. Медведев², Н.М. Демина²

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

²Акционерное общество «НПО Стеклопластик имени Н.Н. Трофимова», Московская область, Солнечногорск, Россия; info@npostek.ru

***Аннотация.** Исследованы теплофизические характеристики прошивных матов из высокотемпературных текстильных материалов отечественного производства. Разработана математическая модель прохождения теплового фронта через образцы в диапазоне рабочих температур испытываемого материала в условиях, моделирующих эксплуатацию в конструкции высокотемпературных печей. Условия эксперимента соответствуют эксплуатации материала в качестве теплоизоляции для термического оборудования. Приведены результаты испытаний прошивных матов различной плотности в условиях одностороннего нагрева и сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными.*

***Ключевые слова:** теплоизоляция, математическое моделирование, волокнистые материалы, нагревательные установки, теплофизические свойства*

***Для цитирования:** Бутаков В.В., Луговой А.А., Бабашов В.Г., Медведев А.В., Демина Н.М. Моделирование прохождения теплового фронта через теплоизоляционный материал и сравнение результата моделирования с результатом испытания материала в условиях одностороннего нагрева // Труды ВИАМ. 2026. № 3 (157). С. 203–214. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-203-214.*

Scientific article

MODELING OF THERMAL FRONT PASSAGE THROUGH THERMAL INSULATION MATERIAL AND COMPARISON OF THE MODELING RESULT WITH THE TEST RESULT OF THE MATERIAL UNDER ONE-SIDED HEATING

V.V. Butakov¹, A.A. Lugovoy¹, V.G. Babashov¹, A.V. Medvedev², N.M. Demina²

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

²Joint Stock Company «NPO Stekloplastic named after N.N. Trofimov», Moscow Region, Solnechnogorsk, Russia; info@npostek.ru

***Abstract.** The thermophysical characteristics of sewing mats made of domestically produced high-temperature textile materials are investigated. A mathematical model has been developed for the passage of a heat front through samples in the operating temperature range of the tested*

material under conditions simulating operation in the construction of high-temperature furnaces. The experimental conditions correspond to the use of the material as thermal insulation for heat-treatment equipment. The test results of sewing mats of various densities under one-sided heating conditions are presented and the simulation results are compared with experimental data.

Keywords: *thermal insulation, mathematical modeling, fibrous materials, heating installations, thermophysical properties*

For citation: Butakov V.V., Lugovoy A.A., Babashov V.G., Medvedev A.V., Demina N.M. Modeling of thermal front passage through thermal insulation material and comparison of the modeling result with the test result of the material under one-sided heating. *Trudy VIAM*, 2026, no. 3 (157), pp. 203–214. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-3-203-214.

Введение

Для технического прогресса в области разработки новых теплотехнических установок, таких как высокотемпературные и низкоинерционные печи, требуется создание новых видов теплоизоляционных и теплозащитных материалов, способных обеспечить надежную работу теплотехнических установок при высоких температурах [1, 2]. В настоящее время для теплоизоляции установок и агрегатов используется широкая номенклатура волокнистых теплоизоляционных материалов на основе тугоплавких оксидов. К преимуществам таких материалов следует отнести высокие рабочую температуру и химическую стойкость, а также низкую теплопроводность. Одно из направлений развития теплоизоляционных материалов – создание многослойных систем, позволяющих оптимизировать их свойства по нескольким параметрам путем подбора материалов различного состава и плотности [3].

Одной из важнейших задач при разработке тепловой защиты является выявление источников термических нагрузок и оценка их влияния на работоспособность теплозащитных материалов. Основа гибкой теплозащиты – волокнистые маты из кварцевых штапельных волокон. По своим физико-механическим характеристикам они относятся к упруго-вязким материалам, физико-механические и теплофизические свойства которых определяются главным образом плотностью и диаметром волокон [4].

В последнее время растет количество научно-технических публикаций, посвященных исследованиям теплофизических свойств материалов для тепловой защиты [5–8], однако остаются актуальными исследования теплофизических свойств теплозащитных материалов с известными физико-механическими свойствами для применения их в гибкой теплозащите [3, 9].

Достоверный учет теплофизических характеристик гибкого теплоизоляционного материала при проектировании многослойной теплоизоляционной системы представляет собой большую сложность, в том числе из-за того, что свойства теплозащитных и теплоизоляционных материалов от разных производителей могут значительно отличаться.

Следует также учитывать, что активно применяемые в настоящее время методы моделирования свойств теплоизоляционного материала имеют заметные расхождения с экспериментальными данными из-за ряда упрощений и допущений при вычислениях. Особенно большие расхождения свойств наблюдаются при моделировании многослойных теплоизоляционных систем.

Основной способ преодоления неточностей при определении теплофизических свойств материалов при проектировании многослойных теплоизоляционных систем – увеличение толщины слоев теплоизоляционного материала или количества слоев теплоизоляции в проектируемой теплоизоляционной системе, что приводит к росту массы теплоизоляции и увеличению инерции в теплоизоляционной системе.

Таким образом, задача по разработке методов достоверной оценки комплекса теплофизических свойств материала актуальна для обеспечения надежной работы проектируемых многослойных теплоизоляционных материалов в условиях эксплуатации в составе высокотемпературных и низкоинерционных печей [10–23].

В статьях [24–27] рассмотрена модель распространения теплового фронта через образец. Модель построена на основе закона теплопроводности Фурье и имеет естественное ограничение для применения к волокнистым теплоизоляционным материалам.

Общеизвестно, что тепловой поток через среду можно представить в виде суперпозиции тепловых потоков, передаваемых по трем механизмам:

- кондуктивная теплопроводность – перенос энергии по твердому телу, эмпирически выражаемый законом Фурье;
- конвективная теплопроводность – теплообмен в подвижной среде;
- радиационная теплопроводность – перенос энергии излучением.

В пористых теплоизоляционных материалах на основе тугоплавких оксидов теплопередача определяется сочетанием кондуктивной теплопроводности (иногда называемой контактной теплопроводностью), теплопроводности через газовую фазу [28], конвективной теплопроводности в газовой фазе и радиационной (лучистой) составляющей эффективной теплопроводности [29]. Поэтому для пористой теплоизоляции рассматривают эффективную теплопроводность, являющуюся суперпозицией всех перечисленных ее видов [30].

Влияние величины пористости, формы и размера пор на эффективную теплопроводность рассмотрено в ряде работ [31]. При небольших температурах (до 500–700 °С) эффективная теплопроводность пористой теплоизоляции в наибольшей степени определяется кондуктивной теплопроводностью, которая зависит от величины пористости и типа поровой структуры. В работе [10] отмечено, что в области низких температур эффективная теплопроводность пористой теплоизоляции линейно уменьшается с увеличением пористости. Кроме того, эффективная теплопроводность пористой керамики снижается при прерывной газовой фазе по сравнению с керамикой, содержащей непрерывную или сквозную пористость. [11].

С ростом температуры (до 700 °С и более) вклад радиационной составляющей теплопередачи в пористой теплоизоляции возрастает. Радиационная составляющая зависит от коэффициента излучения материала (химическая природа материала) и размера пор (структура материала). В работе [10] отмечается, что с ростом размера пор вклад радиационной составляющей возрастает, что особенно заметно при увеличении размера пор >1 мм. В работах [10, 11] на модельных образцах пористой керамики с выгорающими добавками показано, что при общей пористости 70 % при низких температурах (300 °С) эффективная теплопроводность не зависит от размера пор. В то же время при температуре 900 °С эффективная теплопроводность растет с увеличением размера пор. В работе [11] также показано, что с ростом температуры эффективная теплопроводность материала с более крупными порами растет быстрее.

Таким образом, естественное ограничение применимости модели становится совершенно очевидным – теплофизическая модель, построенная на основе закона Фурье, применима для твердого тела до температур ~700 °С. В статьях [24–27] показано, что с приемлемой точностью волокнистый материал в пределах указанных температур можно представить как твердое тело с небольшой теплопроводностью.

В научно-технических литературных источниках [26, 27, 32, 33] показано, что радиационная составляющая теплового потока для волокнистых материалов несущественна вплоть до температур ~700 °С, в то же время вызывает интерес применимость модели для оценки градиента температур при нагреве материала в области 700–1200 °С, где влияние радиационной составляющей теплового потока увеличивается.

Цель данной работы – исследование теплофизических характеристик прошивных матов из высокотемпературных текстильных материалов отечественного производства, а также проверка применимости разработанной модели в диапазоне максимальных рабочих температур испытываемого материала в условиях, моделирующих эксплуатацию в конструкции высокотемпературных печей.

В статье рассмотрены испытания в условиях одностороннего нагрева прошивных матов различной плотности и моделирование прохождения через них теплового фронта. Условия эксперимента соответствуют эксплуатации материала в качестве теплоизоляции термического оборудования (печей, сушильных шкафов). Кроме того, проводится сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными.

Модельные образцы представляют собой волокнистый мат из тонких кварцевых волокон, облицованный в двух сторон кремнеземной тканью и прошитый кремнеземной нитью.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Материалы и методы *Стенд одностороннего нагрева*

Для оценки теплофизических характеристик образцов использовали нестандартный исследовательский стенд с односторонним расположением силовых нагревателей [34]. Стенд одностороннего нагрева представляет собой установку, предназначенную для проведения теплотехнических испытаний и оценки температуропроводности материалов. Основные узлы стенда включают камеру нагрева, испытательную камеру и систему регистрации температурных данных.

Камера нагрева включает силовые нагревательные элементы, расположенные горизонтально, обеспечивающие стабильный тепловой поток в диапазоне температур от 600 до 1200 °С. Это позволяет моделировать условия, приближенные к реальной эксплуатации материала в конструкции печи. Камера оснащена управляющей термопарой, обеспечивающей точное поддержание температуры в рабочей зоне. Для равномерности теплового поля камера изолирована со всех сторон теплоизоляционными плитами. В ее верхней части предусмотрено окно, на которое устанавливается испытываемый образец, превышающий по размерам окно, что минимизирует теплопотери. Таким образом, на горячую сторону воздействует температура, установившаяся внутри камеры.

Исследовательская камера – это зона установки образца. Тепловое воздействие осуществляется снизу, обеспечивая односторонний нагрев. Сверху на образец устанавливается металлическая пластина из алюминиевого сплава, служащая для измерения температуры холодной поверхности. Высота стенок камеры превышает высоту образца, что исключает влияние внешней среды и обеспечивает стабильные условия испытаний.

Система регистрации температурно-временных значений. Для измерения температур на различных этапах нагрева используют термоэлектрические датчики (термопары), расположенные как на горячей, так и на холодной сторонах образца. Кроме того, при необходимости дополнительные термопары устанавливают внутри образца для измерения температурных градиентов по его толщине. Это позволяет получать полную картину теплопередачи через материал и проводить детальный анализ его теплоизоляционных свойств. Для автоматизации сбора данных о температурных изменениях используют многоканальный регистратор температуры [34].

На схеме стенда (рис. 1) приведены основные элементы конструкции, с помощью которых с использованием многоканального регистратора РМТ-59 регистрируют показания термопар с интервалом в 1 с.

Обработку результатов измерений производили в электронных таблицах.

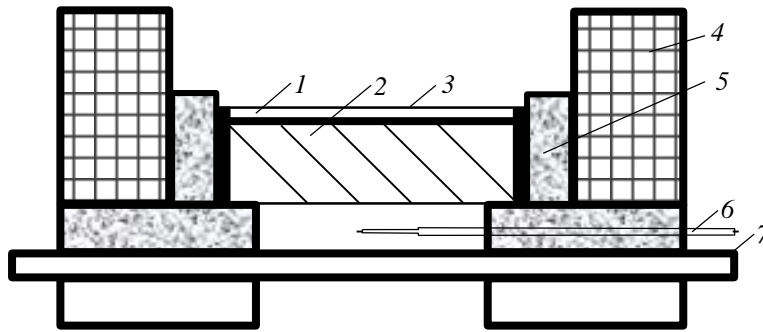


Рис. 1. Схема рабочей зоны исследовательского стенда: 1 – металлическая (алюминиевая) пластина; 2 – образец исследуемого материала; 3 – термопара холодной стороны; 4 – теплоизоляция стенда; 5 – защитная маска; 6 – термопара горячей стороны; 7 – силиловые нагреватели

Модельные образцы

Модельные образцы представляют собой волокнистый мат из тонких кварцевых волокон, облицованный в двух сторон кремнеземной тканью и прошитый кремнеземной нитью. Схематическое изображение прошивного мата представлено на рис. 2.

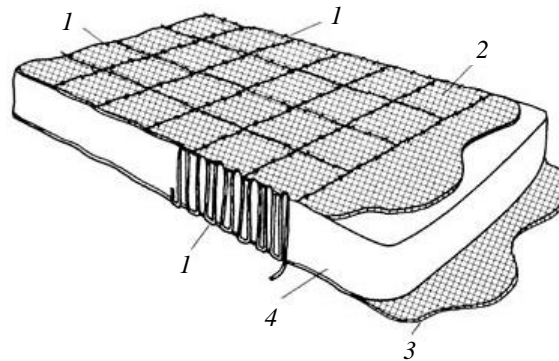


Рис. 2. Схематическое изображение прошивного мата: 1 – прошивная нить; 2 – верхний слой ткани; 3 – нижний слой ткани; 4 – волокнистый мат

В модельных образцах, подготовленных для проведения теплофизических испытаний, верхний и нижний слои – ткань кремнеземная марки КТ-11-13; волокнистый мат – кварцевое штапельное волокно марки ТКВ с номинальным диаметром, равным 2 мкм; прошивная нить марки К11С6-180 производства АО «НПО Стеклопластик».

Основные характеристики модельных образцов представлены в таблице.

Характеристики модельных образцов

Условный номер образца	Плотность, кг/м ³	Плотность мата, кг/м ³	Масса образца, г	Габариты образца Д×Ш×В, мм
1	135	75	34	100×100×20
2	155	95	39	100×100×25
3	179	118	45	100×100×30

На рис. 3 изображен образец 1. Внешний вид образцов идентичен, они отличаются только по толщине.



Рис. 3. Внешний вид образца прошивного мата

Модель прохождения теплового потока

Модель построена на предположении, что волокнистый теплоизоляционный материал можно представить в виде твердого тела с определенной теплопроводностью. Для моделирования прохождения теплового потока через плоский образец некоторой толщины он представлен в виде набора плоских конечных элементов небольшой толщины (1/4 общей толщины образца).

Рассматривая многослойный образец теплоизоляционного материала при допущении, что время между измерениями температуры достаточно мало и рассматриваемый слой образца достаточно тонкий для того, чтобы в каждый момент времени можно было считать градиент температуры между лицевыми гранями слоя образца линейным, а температуру образца в течение шага постоянной, то для теплового потока через слой образца будет выполняться соотношение

$$\alpha_{\text{гор}}(T_{\text{гор}} - T_{\text{гс}})\tau = \lambda \frac{(T_{\text{гс}} - T_{\text{хс}})}{l} \tau + \sigma U = \alpha_{\text{хол}}(T_{\text{хс}} - T_{\text{хол}})\tau,$$

где τ – временной интервал между измерениями; α – коэффициент теплоотдачи; λ – коэффициент эффективной теплопроводности; l – толщина образца или слоя (между лицевыми сторонами); σU – изменение внутренней энергии образца (слоя образца) за время τ ; $T_{\text{гор}}$ и $T_{\text{хол}}$ – температура среды соответственно на горячей и холодной стороне образца; $T_{\text{гс}}$ и $T_{\text{хс}}$ – температура лицевой горячей и холодной стороны образца соответственно.

Теплопроводность конечного элемента ($\lambda_{\text{эф}}$) задается в виде функции $\lambda = f(T)$, где T – средняя температура конечного элемента.

С учетом того, что материал образца известен, известна также его теплопроводность. В модели в качестве теплопроводности использовалось значение экспоненциальной функции $\lambda_{\text{эф}} = \lambda_0 e^T$. Достоверность приближения составляет 92–96 %.

Коэффициенты теплопоглощения/теплоотдачи ($\alpha_{\text{гор}}$ и $\alpha_{\text{хол}}$) на лицевых гранях образца являются эмпирическими и известны для стенда [34] из предыдущих работ [25–27].

В качестве исходных данных в модель внесены значения плотности образца и его удельной теплоемкости, а также толщины. Для граничных условий задают температуры нагревателя и окружающей среды (на горячей стороне помещается нагреватель бесконечной теплоемкости, на холодной стороне – охладитель бесконечной теплоемкости).

С применением закона Фурье по модели методом конечных элементов с шагом в 1 с рассчитали температуры каждого конечного элемента в зависимости от времени,

прошедшего с начала эксперимента. Результат работы модели можно представить в виде набора значений функции $T_n=f(t)$, где T_n – температура конечного элемента с номером n – от 1 до 4 (увеличивается от горячего слоя к холодному); t – время, прошедшее с начала эксперимента.

Результаты и обсуждение

Испытания на исследовательском стенде одностороннего нагрева

Исследования проводили на модельных образцах теплоизоляционных материалов квадратной формы размером 100×100 мм и различной толщины. В ходе эксперимента образцы подвергали нагреву до температуры 1100 °С, а время выдержки при этой температуре составляло не менее 10 мин. Образцы помещали в предварительно разогретую исследовательскую камеру. В процессе испытаний проводили сравнение температурных профилей для однослойных материалов с различной плотностью.

В результате проведенных исследований образцы не претерпели внешних изменений. Это может свидетельствовать о том, что рабочая температура облицовочного материала для модельного образца выше, чем температура проведения испытания. На рис. 4 приведены зависимости температуры на холодной стороне материала от времени с начала эксперимента.

Моделирование теплового потока через образец

В качестве исходных данных в модель вносили: температуру нагревателя (1100 °С); геометрические размеры, плотность и теплопроводность моделируемых материалов в соответствии с характеристиками исследованных образцов.

Основным результатом работы модели является набор значений функции $T_4 = f(t)$ для самого холодного слоя материала. Результаты моделирования также представлены в графическом виде на рис. 4, где сплошными линиями показан результат моделирования (температура на холодной стороне), а точками соответствующих цветов – температуры на холодной стороне модельных образцов (реальные измерения).

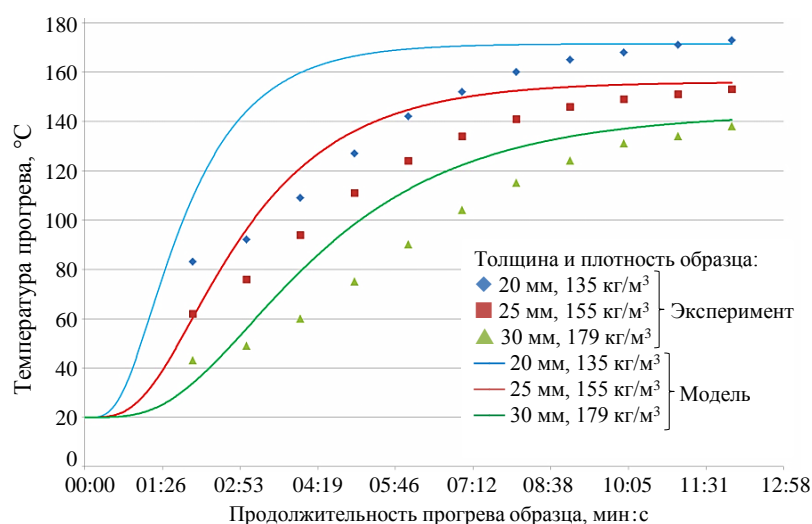


Рис. 4. Сравнительный анализ графиков распространения теплового фронта, полученных экспериментально и при помощи модели

Отметим некоторые особенности, наглядно наблюдаемые на рис. 4:
– тепловое равновесие достигается приблизительно за 10–12 мин;

- температура на холодной стороне исследуемых образцов после установления теплового равновесия составляет 140–180 °С;
- модель прогнозирует равновесную температуру на холодной стороне образцов с приемлемой точностью даже для высоких температур, притом что температура 1100 °С на горячей стороне образца – это пограничное значение для области применимости модели;
- прогрев по модели происходит значительно быстрее, чем прогрев реальных образцов – наблюдается значительное расхождение в поведении модели и реального образца на этапе его прогрева (до установления теплового равновесия).

Заключения

При одностороннем прогреве исследуемых образцов тепловое равновесие (стационарный тепловой поток) устанавливается в течение 10–12 мин. Температура на холодной стороне испытанных образцов при заданных условиях испытания находится в пределах 140–180 °С. С возрастанием значений толщины и плотности образца температура на холодной стороне образца снижается.

В дальнейшем исследовании следует продолжить в направлении экспериментов с разделением влияния толщины и плотности на установившуюся температуру на холодной стороне образца.

При сравнении результатов моделирования с результатами эксперимента установлено, что предложенная модель может применяться для прогнозирования температуры на холодной стороне волокнистого теплоизоляционного материала при одностороннем нагреве для стационарного теплового потока, что соответствует эксплуатации материалов в конструкции высокотемпературной печи. Условия применимости модели следующие:

- образец не претерпевает значительных изменений в результате испытания – не горит, сохраняет форму и не теряет массу;
- регулируемые температуры – от 200 до 1000 °С;
- толщина образца – от 20 до 30 мм;
- плотность образца – от 120 до 180 кг/м³;
- теплоотдача на холодной стороне образца происходит в неподвижную или мало-подвижную воздушную среду при атмосферном давлении и температуре помещения 15–25 °С, без принудительного охлаждения. Температура помещения считается постоянной, объемы помещения – значительными.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
3. Медведев А.В., Гофин М.Я. Прошивные маты из кварцевых материалов низкой плотности // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2024. № 4. С. 92–96. DOI: 10.46418/0021-3489_2024_68_04_20.
4. Keller K., Antonenko J., Weber K.H. High-Temperature Insulations // ESA Bulletin. 1994. No. 80. URL: <https://www.esa.int/esapub/bulletin/bullet80/keller80.htm> (дата обращения: 29.07.2025).
5. Падерин Л.Я., Прусов Б.В., Токарев О.Д. Исследование теплопроводности пористых теплоизоляционных материалов при высоких температурах // Ученые записки ЦАГИ. 2011. Т. XLII. № 4. С. 77–83.

6. Томак В.И., Бурков А.С., Рыцарев А.М., Товстоног В.А. Экспериментальная оценка теплофизических характеристик высокотемпературных теплоизоляционных материалов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Естественные науки. 2020. № 2. С. 99–116. DOI: 10.18698/1812-3368-2020-2-99-116.
7. Зуев А.В., Заринчяк Ю.П., Размахов М.Г. Предпосылки к выбору модели структуры высокопористых волокнистых материалов для учета влияния технологических факторов и расчета теплопереноса // Труды ВИАМ. 2019. № 12 (84). С. 109–118. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-109-118.
8. Зуев А.В., Заринчяк Ю.П., Баринов Д.Я. Определение теплопроводности теплозащитного материала на основе волокон оксида кремния // Труды ВИАМ. 2021. № 2 (96). С. 88–98. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-88-98.
9. Струк А.А., Медведев А.В., Разумеев К.Э. Исследование зависимости плотности кремнеземных нетканых волокнистых материалов от величины удельной нагрузки // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2024. № 1. С. 9–20. DOI: 10.24412/2079-7958-2024-1-9-20.
10. Жуковская А.Е., Кортель А.А., Шерман Е.А. и др. Применение кремнийорганических полимеров в технологии корундовых огнеупоров // Огнеупоры. 1980. № 8. С. 51–55.
11. Дудеров И.Г., Полубояринов Д.Н. Влияние пористости и строения корундовых огнеупоров на их теплопроводность // Огнеупоры. 1963. № 2. С. 518–524.
12. Шариков Ю.В., Маркус А.А. Математическое моделирование тепловых полей во фрагменте футеровки вращающейся печи // Металлург. 2013. № 12. С. 23–26.
13. Губарева К.В., Попов А.И., Зинина С.А. и др. Моделирование процессов теплообмена в пластине с переменными теплофизическими свойствами // Научное обозрение. Технические науки. 2020. № 6. С. 52–57.
14. Лыков А.В. Теория теплопроводности: учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
15. Кудинов В.А., Карташов Э.М., Стефанюк Е.В. Техническая термодинамика и теплопередача М.: Юрайт, 2011. 560 с.
16. Дубский Г.А., Егорова Л.Г., Кухта Ю.Б., Бондаренко Е.Г. Программное обеспечение для математического моделирования теплофизических процессов в слоистых структурах // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2010. № 2. С. 76–79.
17. Тугов В.В., Акимов И.А. Разработка математических моделей теплопередачи в многослойных конструкциях // Фундаментальные исследования. 2020. № 8-2. С. 320–324.
18. Зверев В.Г., Гольдин В.Д., Назаренко В.А. Радиационно-кондуктивный теплоперенос в волокнистой термостойкой изоляции при тепловом воздействии // Теплофизика высоких температур. 2008. Т. 46. № 1. С. 119–125.
19. Зуев А.В., Заринчяк Ю.П., Баринов Д.Я., Краснов Л.Л. Исследование теплофизических свойств гибкого теплоизоляционного материала // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). С. 119–126. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 29.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-119-126.
20. Зуев А.В., Заринчяк Ю.П., Воробьев Н.Н., Барботько С.Л. Оценка теплопереноса в гибкой волокнистой теплоизоляционной композиции // Инженерно-физический журнал. 2023. Т. 96. № 3. С. 593–606.
21. Калабин А.Л. Модель структуры волокнистых систем для исследования теплофизических свойств // Математические методы в технологиях и технике. 2021. № 8. С. 39–42. DOI: 1052348/2712-8873_MMTT_2021_8_39.
22. Шампаров Е.Ю., Жагина И.Н., Родэ С.В. Тепловой перенос в легких теплозащитных материалах // Современные задачи инженерных наук: сб. науч. тр. VI Междунар. науч.-техн. симпозиума, Междунар. науч.-техн. форума: в 2 т. Москва, 2017. Т. 2. С. 236–240.
23. Кутагеладзе С.С. Основы теории теплообмена. 5-е изд. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.

24. Бутаков В.В., Луговой А.А., Варрик Н.М., Бабашов В.Г. Оценка теплопроводности слоистого высокопористого теплоизоляционного материала // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 3 (68). С. 120–129. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 29.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-120-129.
25. Бутаков В.В., Шавнев А.А., Луговой А.А., Варрик Н.М., Бабашов В.Г. Подход к построению математической модели прохождения теплового фронта через образец теплозащитного материала в условиях нестационарного теплового потока // *Труды ВИАМ*. 2022. № 6 (112). С. 127–137. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-127-137.
26. Луговой А.А., Бабашов В.Г., Карпов Ю.В. Температуропроводность градиентного теплоизоляционного материала // *Труды ВИАМ*. 2014. № 2. С. 17–22. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.07.2025).
27. Бутаков В.В., Луговой А.А., Варрик Н.М., Бабашов В.Г. Моделирование распространения теплового фронта через образец многослойного теплоизоляционного материала в условиях нестационарного теплового потока // *Труды ВИАМ*. 2022. № 10 (116). С. 128–139. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-128-139.
28. Кайнарский И.С., Дегтярева Э.В., Орлова И.Г. Корундовые огнеупоры и керамика. М.: Металлургия, 1981. 168 с.
29. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. М.: Физматгиз, 1962. 456 с.
30. Михеев М.А. Основы теплопередачи. М.: Госстройиздат, 1956. 392 с.
31. Глебов С.В. Легковесные огнеупоры. М.: Metallurgizdat, 1945. С. 73–75.
32. Манешев И.О., Правник Ю.И., Садыков Р.А. и др. Экспериментальное определение коэффициентов теплопроводности и эффективности сверхтонких теплоизоляционных покрытий // *Известия КГАСУ*. 2013. № 1 (23). С. 135–142.
33. Карпов Д.В., Павлов М.В., Синицын А.А. и др. Экспериментально-расчетное определение коэффициента теплопроводности твердого тела на примере силикатного кирпича активным методом теплового неразрушающего контроля // *Вестник ТГАСУ*. 2014. № 2. С. 118–126.
34. Стенд для качественной оценки теплоизоляционных материалов: пат. 156904 Рос. Федерация; заявл. 25.09.14; опубл. 20.11.15.

References

1. Kablov E.N. New-generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
2. Kablov E.N. New-generation materials – the basis for innovation, technological leadership, and national security of Russia. *Intellekt i tekhnologii*, 2016, no. 2 (14), pp. 16–21.
3. Medvedev A.V., Gofin M.Ya. Stitched mats made of low-density quartz materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya legkoy promyshlennosti*, 2024, no. 4, pp. 92–96. DOI: 10.46418/0021-3489_2024_68_04_20.
4. Keller K., Antonenko J., Weber K.H. High-Temperature Insulations. *ESA Bulletin*, 1994, no. 80. Available at: <https://www.esa.int/esapub/bulletin/bullet80/keller80.htm> (accessed: July 29, 2025).
5. Paderin L.Ya., Prusov B.V., Tokarev O.D. Study of thermal conductivity of porous thermal insulation materials at high temperatures. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2011, vol. XLII, no. 4, pp. 77–83.
6. Tomak V.I., Burkov A.S., Rytsarev A.M., Tovstonog V.A. Experimental assessment of thermophysical characteristics of high-temperature thermal insulation materials. *Vestnik MGTU im. N.E. Baubana. Ser.: Yestestvennye nauki*, 2020, no. 2, pp. 99–116. DOI: 10.18698/1812-3368-2020-2-99-116.
7. Zuev A.V., Zarichnyak Yu.P., Razmakhov M.G. Prerequisites for the selection of the structure model of highly porous fibrous materials to take into account the influence of technological factors and the calculation of heat transfer. *Trudy VIAM*, 2019, no. 12 (84), pp. 109–118. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 29, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-109-118.

8. Zuev A.V., Zarichnyak Yu.P., Barinov D.Ya. Measurement of thermophysical properties rigid fiber insulation. *Trudy VIAM*, 2021, no. 2 (96), pp. 88–98. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 29, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-88-98.
9. Struk A.A., Medvedev A.V., Razumeev K.E. Study of the dependence of the density of silica non-woven fibrous materials on the specific load. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2024, no. 1, pp. 9–20. DOI: 10.24412/2079-7958-2024-1-9-20.
10. Zhukovskaya A.E., Kortel A.A., Sherman E.A. et al. Application of organosilicon polymers in the technology of corundum refractories. *Ogneupory*, 1980, no. 8, pp. 51–55.
11. Duderov I.G., Poluboyarinov D.N. Influence of porosity and structure of corundum refractories on their thermal conductivity. *Ogneupory*, 1963, no. 2, pp. 518–524.
12. Sharikov Yu.V., Markus A.A. Mathematical modeling of thermal fields in a fragment of a rotary kiln lining. *Metallurg*, 2013, no. 12, pp. 23–26.
13. Gubareva K.V., Popov A.I., Zinina S. A. et al. Modeling of heat transfer processes in a plate with variable thermophysical properties. *Nauchnoye obozreniye. Tekhnicheskiye nauki*, 2020, no. 6, pp. 52–57.
14. Lykov A.V. *Theory of heat conductivity: a textbook for universities*. Moscow: Vysshaya shkola, 1967, 600 p.
15. Kudinov V.A., Kartashov E.M., Stefanyuk E.V. *Technical Thermodynamics and Heat Transfer*. Moscow: Yurait, 2011, 560 p.
16. Dubskiy G.A., Egorova L.G., Kukhta Yu.B., Bondarenko E.G. Software for Mathematical Modeling of Thermophysical Processes in Layered Structures. *Informatsionnyye tekhnologii v proyektirovanii i proizvodstve*, 2010, no. 2, pp. 76–79.
17. Tugov V.V., Akimov I.A. Development of Mathematical Models of Heat Transfer in Multilayer Structures. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2020, no. 8-2, pp. 320–324.
18. Zverev V.G., Goldin V.D., Nazarenko V.A. Radiative-conductive heat transfer in fibrous heat-resistant insulation under thermal influence. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2008, vol. 46, no. 1, pp. 119–125.
19. Zuev A.V., Zarichnyak Yu.P., Barinov D.Ya., Krasnov L.L. Measurement of thermophysical properties of flexible thermal insulation. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), pp. 119–126. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 29, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-119-126.
20. Zuev A.V., Zarichnyak Yu.L., Vorobyov N.N., Barbotko S.L. Evaluation of heat transfer in a flexible fibrous thermal insulation composite. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 2023, vol. 96, no. 3, pp. 593–606.
21. Kalabin A.L. Model of the structure of fibrous systems for studying thermophysical properties. *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike*, 2021, no. 8, pp. 39–42. DOI: 1052348/2712-8873_MMTT_2021_8_39.
22. Shamparov E.Yu., Zhagrina I.N., Rode S.V. Heat transfer in lightweight thermal insulation materials. *Modern problems of engineering sciences: col. of sc. papers of Proceedings of the VI Int. Sc. and Tech. Symposium, Int. Sc. and Tech. Forum: in 2 vols*. Moscow, 2017, vol. 2, pp. 236–240.
23. Kutageladze S.S. *Fundamentals of Heat Transfer Theory*. 5th ed. Moscow: Atomizdat, 1979, 416 p.
24. Butakov V.V., Lugovoy A.A., Varrik N.M., Babashov V.G. Assessment of thermal conductivity of a layered highly porous thermal insulation material. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 3 (68), pp. 120–129. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 29, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-120-129.
25. Butakov V.V., Shavnev A.A., Lugovoy A.A., Varrik N.M., Babashov V.G. An approach to the construction of a mathematical model of the passage of a heat front through a sample of a heat-shielding material under conditions of an unsteady heat flow. *Trudy VIAM*, 2022, no. 6 (112), pp. 127–137. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 29, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-127-137.

26. Lugovoy A.A., Babashov V.G., Karpov Yu.V. The thermal diffusivity of the gradient thermal insulation material. *Trudy VIAM*, 2014, no. 2, pp. 17–22. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 29, 2025).
27. Butakov V.V., Lugovoy A.A., Varrik N.M., Babashov V.G. Simulation of the propagation of a heat front through a sample of a multilayer thermal insulation material under conditions of non-stationary heat flow. *Trudy VIAM*, 2022, no. 10 (116), pp. 128–139. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 29, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-128-139.
28. Kainarskii I.S., Degtyareva E.V., Orlova I.G. *Corundum Refractories and Ceramics*. Moscow: Metallurgiya, 1981, 168 p.
29. Chudnovsky A.F. *Thermophysical Characteristics of Dispersed Materials*. Moscow: Fizmatgiz, 1962, 456 p.
30. Mikheev M.A. *Fundamentals of Heat Transfer*. Moscow: Gosstroyizdat, 1956, 392 p.
31. Glebov S.V. *Lightweight Refractories*. Moscow: Metallurgizdat, 1945, pp. 73–75.
32. Maneshev I.O., Pravnik Yu.I., Sadykov R.A. et al. Experimental Determination of Thermal Conductivity Coefficients and Efficiency of Ultra-Thin Thermal Insulation Coatings. *Izvestiya KGASU*, 2013, no. 1 (23), pp. 135–142.
33. Karpov D.V., Pavlov M.V., Sinitsyn A.A. et al. Experimental and Calculated Determination of Thermal Conductivity Coefficient of a Solid Using Sand-Lime Brick as an Example by Active Thermal Non-Destructive Testing. *Vestnik TGASU*, 2014, no. 2, pp. 118–126.
34. *Test Rig for Qualitative Assessment of Thermal Insulation Materials*: pat 156904 Rus. Federation; appl. 25.09.14; publ. 20.11.15.

Информация об авторах

Бутакوف Вячеслав Владимирович, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Луговой Алексей Алексеевич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Бабашов Владимир Георгиевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Медведев Александр Викторович, старший научный сотрудник, д.т.н., АО «НПО Стеклопластик», info@npostek.ru

Демина Наталья Михайловна, ученый секретарь, д.т.н. АО «НПО Стеклопластик», info@npostek.ru

Information about the authors

Vyacheslav V. Butakov, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Aleksey A. Lugovoy, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vladimir G. Babashov, Head of the Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander V. Medvedev, Senior Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), JSC «NPO Stekloplastik», info@npostek.ru

Natalia M. Demina, Academic Secretary, Doctor of Sciences (Tech.), JSC «NPO Stekloplastik», info@npostek.ru

Статья поступила в редакцию 19.08.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 25.08.2025.
The article was submitted 19.08.2025; approved and accepted for publication after reviewing 25.08.2025.