

Научная статья

УДК 621.763

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-128-139

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ФРОНТА ЧЕРЕЗ ОБРАЗЕЦ МНОГОСЛОЙНОГО ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООВОГО ПОТОКА

В.В. Бутаков<sup>1</sup>, А.А. Луговой<sup>1</sup>, Н.М. Варрик<sup>1</sup>, В.Г. Бабашов<sup>1</sup>

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

**Аннотация.** Актуальной задачей для разработчиков теплозащитных материалов является создание методов всесторонней оценки комплекса ключевых свойств, надежно обеспечивающих их работу в условиях эксплуатации. Цель данного исследования – оценка свойств слоистого теплозащитного материала, достаточных для моделирования распространения теплового фронта через образец в условиях нестационарного теплового потока. Проведена работа по оценке теплофизических свойств материала, достаточных для построения модели распространения теплового фронта через образец при одностороннем нагреве. Создана модель прохождения теплового фронта через материал. Проведена работа по численной оценке коэффициентов теплопроводности и теплоотдачи на лицевых сторонах многослойного образца.

**Ключевые слова:** теплоизоляционный материал, коэффициент теплопроводности, тепловой поток, многослойные многокомпонентные теплозащитные системы

**Для цитирования:** 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). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-128-139.

Scientific article

## SIMULATION OF THE PROPAGATION OF A HEAT FRONT THROUGH A SAMPLE OF A MULTILAYER THERMAL INSULATION MATERIAL UNDER CONDITIONS OF NON-STATIONARY HEAT FLOW

V.V. Butakov<sup>1</sup>, A.A. Lugovoy<sup>1</sup>, N.M. Varrik<sup>1</sup>, V.G. Babashov<sup>1</sup>

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

**Abstract.** An urgent task for developers of heat-protective materials is to create methods for a comprehensive assessment of the complex of their key properties that reliably ensure their operation under operating conditions. The purpose of this study is to evaluate the properties of a layered heat-shielding material sufficient to simulate the propagation of a heat front through a sample under conditions of non-stationary heat flow. Work has been carried out to evaluate a set of thermophysical properties of the material sufficient to construct a model of the propagation of a thermal front through a sample under unilateral heating. A model of the passage of the heat front through the material has been created. The work on the numerical evaluation of the thermal conductivity coefficient and the heat transfer coefficient on the front sides of the multilayer sample was carried out.

**Keywords:** thermal insulation material, thermal conductivity coefficient, heat flux, multilayer multicomponent heat protection systems

*For citation:* 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), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-128-139.

## Введение

Разработка и создание новых материалов – ключевые факторы научно-технического прогресса. Развитие высокоскоростных и высокоэнергетических объектов современной техники требует создания новых теплозащитных и теплоизоляционных материалов, способных работать в широком интервале температур – от отрицательных до очень высоких. Начало новой космической эры в середине прошлого века обусловило появление космического материаловедения и способствовало созданию новых материалов, необходимых для обеспечения работы космических аппаратов [1]. Настоящее время – период формирования нового мирового уклада, сопровождаемого трансформационными процессами, обусловленными истощением действующих моделей социально-экономического развития, интенсивным научно-технологическим прогрессом и переоценкой базовых ценностей [2]. При интенсивном научно-технологическом развитии требуется создание новых теплозащитных материалов и методов их исследования, в том числе математических методов прогнозирования поведения материалов при эксплуатации.

Важными факторами при оценке эксплуатационных свойств теплозащитных материалов, как существующих, так и вновь разработанных, являются их теплофизические характеристики, в частности теплопроводность теплозащитного материала.

Известно, что теплообмен представляет собой сложное явление, сочетающее несколько видов переноса теплоты: теплопроводность, конвекцию и теплообмен излучением.

Теплопроводность имеет место при перепадах температур и состоит в переносе теплоты микрочастицами вещества, механизм зависит от его агрегатного состояния. В газовой среде теплообмен происходит благодаря обмену кинетической энергией движущихся молекул газа. В твердых диэлектриках теплоперенос осуществляется в результате силового взаимодействия молекул в процессе столкновений колеблющихся частиц. В металлах дополнительный теплообмен происходит за счет столкновения свободных электронов. Конвекция обусловлена перемещением макрообъемов вещества и имеет место только в жидкостях и газах. При теплообмене излучением перенос теплоты осуществляется посредством электромагнитных волн. При этом происходит двойное превращение энергии: внутренняя энергия вещества превращается в энергию излучения (энергию электромагнитных волн), которая распространяется в пространстве и, попадая на тела, способные ее поглощать, снова превращается во внутреннюю энергию этих тел [3–6].

Актуальная задача для разработчиков теплозащитных материалов – разработка методов всесторонней оценки комплекса их ключевых свойств, надежно обеспечивающих работу при эксплуатации [7–11]. Одним из таких ключевых свойств теплозащитного материала является его теплопроводность.

Теплопроводность зависит от строения материала и кажущейся плотности, определяемой пористостью. Разработчики выбирают материалы, обладающие требуемым комплексом физико-механических свойств, и на их основе создают высокопористые структуры. Современные виды теплоизоляции в основном представляют собой пористые системы из термостойких материалов, содержащие различные виды связующих, наружные защитные покрытия и нередко вещества с фазовым переходом, т. е. представляют собой многопараметрическую систему, выполняющую определенные задачи [12–16]. В частности, теплозащитная система, как правило, содержит неорганическое волокно, которое обеспечивает хорошие теплоизоляционные свойства благодаря низкому

коэффициенту теплопроводности, и высокотермостойкое волокно, стойкое к прогоранию при воздействии пламени и температура плавления которого больше температуры пламени, а также облицовочное термостойкое покрытие, обеспечивающее сохранение свойств теплоизоляционного материала в процессе эксплуатации и его защиту от осыпания и загрязнения. Теплозащитная система может дополнительно содержать слои из прочных и гибких волокон (например, арамидных) с органическими пропитками, которые вводятся для повышения коэффициента затухания звуковой волны, антипиреновые пропитки, способствующие повышению огнестойкости, а также жертвенные вещества с фазовым переходом, позволяющие увеличить время, в течение которого теплозащитный материал сохраняет свои свойства при воздействии экстремально высоких температур.

В качестве примера теплозащитных систем можно привести высокопористые материалы на основе аморфных наночастиц диоксида кремния для тепловой защиты электронных модулей памяти [12] и композиционные материалы с использованием полых микросфер [13]. Еще одним видом эффективной теплозащиты является гибкий теплоизоляционный волокнистый материал на основе минеральных волокон и волокон растительного происхождения, содержащий также органическое связующее [14]. Часто теплоизоляционные материалы содержат несколько видов волокон (например, слои базальтовых, кремнеземных и арамидных волокон), термостойкие связующие (такие как полисульфон или фенолформальдегидная смола) и облицовочную стеклоткань [15]. Некоторые виды теплозащитных систем, разработанные для контейнеров с жидким водородом, могут содержать слои пористой волокнистой теплоизоляции, разделенные газонепроницаемой пленкой, где поры каждого слоя заполнены различными видами газа [16].

Теплоперенос в указанных теплозащитных системах осуществляется как за счет теплопроводности элементов среды, так и за счет конвективного, молекулярного и радиационного переноса энергии, а также в процессе физико-химических превращений и гетерогенных химических реакций между компонентами материала. Определение теплофизических характеристик теплозащитного материала только экспериментальным путем затруднено, особенно в случае высоких и сверхвысоких температур. Большинство методов определения теплопроводности имеет ограниченную область применения либо они сложны для технической реализации. Это касается материалов со сложным структурным строением – именно такие композиционные материалы широко используют в современных аэрокосмических, энергетических и технологических конструкциях.

В этом случае на первый план выходит проблема достоверности данных по ключевым теплофизическим свойствам, которая осложняется несколькими обстоятельствами. Неточности эксперимента возникают из-за отсутствия испытательного оборудования, способного воспроизводить условия, близкие к условиям эксплуатации материала, что приводит к достаточно существенным отличиям между истинными и экспериментально вычисленными характеристиками материала.

Достоверность данных при определении теплофизических характеристик осложняется еще и тем, что свойства большой номенклатуры теплозащитных и теплоизоляционных материалов от разных разработчиков и производителей также могут отличаться. Следует также учитывать, что при использовании существующих методов математического моделирования показатели основных свойств теплозащитного материала имеют недостаточно высокое совпадение с экспериментальными данными из-за ряда упрощений и допущений при вычислениях, особенно в случае многослойного материала с большим количеством компонентов, в том числе разлагаемых при нагревах.

Неточности в определении важных теплофизических характеристик при проектировании новых теплозащитных материалов учитывают, закладывая проектные запасы – например, за счет введения дополнительных слоев теплоизоляции или увеличения толщины материала, что приводит к повышению его массы.

Одна из сложностей в решении комплекса теплофизических задач применительно к таким видам теплоизоляции заключается в том, что перенос энергии через объем образца при высоких температурах не может быть обусловлен в наибольшей степени каким-либо одним физическим механизмом в пределах одного образца. Тем не менее при проектировании теплозащитных систем, особенно многослойных и многокомпонентных, для надежной и объективной оценки их теплофизических характеристик во всем диапазоне температур необходимо совершенствовать расчетно-экспериментальную методологию на основе теории обратных задач теплообмена, определять реперные точки для создания математических моделей, что позволит создавать перспективные виды теплоизоляции с прогнозируемыми свойствами.

Стенд, представленный в работах [17, 18], позволяет осуществлять односторонний нагрев образцов и получать картину распространения теплового фронта по заранее определенным точкам образца. В статьях [19, 20] подробно описан способ оценки эффективной теплопроводности отдельного слоя многослойного теплозащитного материала в условиях одностороннего нагрева и показана принципиальная возможность оценки коэффициента теплоотдачи материала на горячей стороне образца.

Цель данной работы – оценка свойств материала, достаточных для моделирования распространения теплового фронта через образец в условиях нестационарного теплового потока. Проведенное исследование также позволяет уточнить параметры эксперимента для повышения достоверности оценки теплофизических свойств материала.

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

### Материалы и методы

#### *Теплофизическая задача*

В работах [14, 15] подробно описано уравнение состояния теплового потока, проходящего через плоский образец.

На рис. 1 представлен пример распределения температуры по толщине прямоугольного образца размером  $a \times b$  и толщиной  $l$  в случае стационарного или квазистационарного теплового потока ( $T_{гор}$  и  $T_{хол}$  – температура среды соответственно на горячей и холодной лицевой стороне образца).

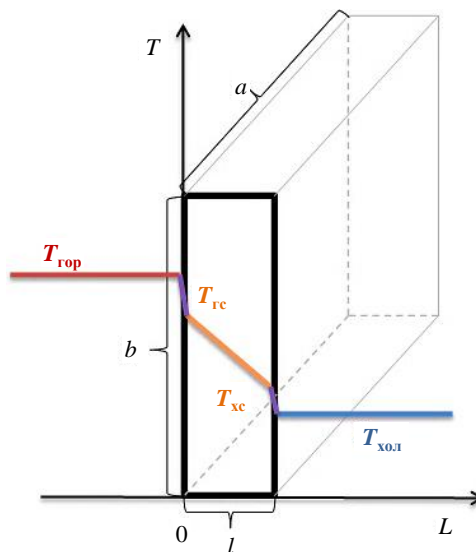


Рис. 1. Представление о распределении температуры по толщине плоской стенки образца при одностороннем нагреве

Рассмотрим многослойный образец теплоизоляционного материала. Если допустить, 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, проходящего 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  $T_{\text{гс}}$  – температура лицевой горячей стороны образца;  $T_{\text{хс}}$  – температура лицевой холодной стороны образца;  $\tau$  – временной интервал между измерениями;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $\lambda$  – коэффициент эффективной теплопроводности;  $l$  – толщина образца или слоя (между лицевыми сторонами);  $\sigma U$  – изменение внутренней энергии образца (слоя образца) за время  $\tau$ .

Данное соотношение позволяет оценивать коэффициенты теплоотдачи и теплопроводности для образца теплоизоляционного материала.

### Материалы

Исследовали многослойный образец теплоизоляционного материала, состоящий из четырех слоев: толщина слоев 1 см, плотность слоев 0,1 г/см<sup>3</sup>. Слои образца одинаковые (вырезаны из одного листа теплоизоляционного материала). Между слоями помещены термоэлектрические преобразователи (термопары типа хромель-алюмель).

Образец подвергали одностороннему нагреву (при помощи стенда, представленного в работе [18]), регистрировали показания термопар с интервалом в 1 с при помощи многоканального регистратора РМТ-59.

Обработку результатов измерений производили в электронных таблицах в Excel.

### Результаты и обсуждение

В результате испытаний получено распределение температур по толщине образца во времени. На рис. 2 и 3 приведены графики с исходными данными для обработки (где С1–С5 – показания термопар, расположенных перед (ближе к горячей стороне) слоем с соответствующим номером – соответственно, С5 расположена выше четвертого слоя образца (перед отсутствующим пятым); ТП<sub>С1</sub> и ТП<sub>С5</sub> – показания дополнительных термопар, расположенных там же, где термопары С1 и С5; ТП<sub>упр</sub> – показания управляющей термопары стенда; ТП<sub>печь</sub> и ТП<sub>комн</sub> – показания термопар, расположенных в объеме печи и в помещении вблизи горячей поверхности стенда; С12 – показания термопары, утопленной в глубину слоя 1).

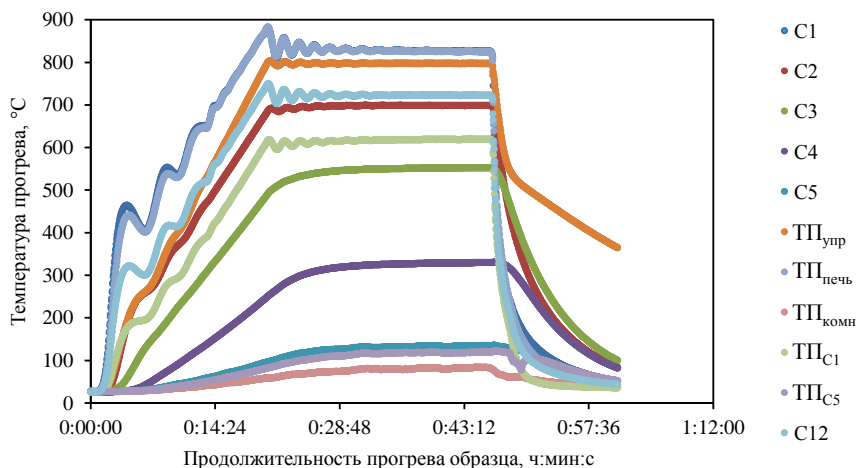


Рис. 2. Исходные данные эксперимента «Прогрев 1»

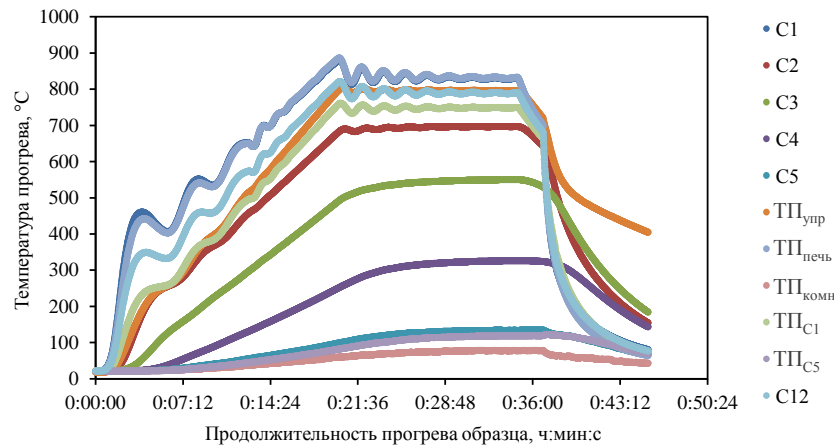


Рис. 3. Исходные данные эксперимента «Прогрев 2»

Первый участок испытания, представляющий интерес для данного исследования, – это участок, на котором происходит прогрев образца.

Участок испытаний, в пределах которого тепловой фронт не доходит до холодной лицевой стороны образца, выделялся как «Прогрев образца» и использован для оценки коэффициента теплопроводности слоев 1 и 2 образца, а также для оценки его коэффициента теплоотдачи на горячей лицевой стороне.

Для эксперимента «Прогрев 1» выбрана область от начала измерений до 00:07:53, для эксперимента «Прогрев 2» – от начала измерений до 00:07:22.

В этой области данных оценивали коэффициент теплопроводности слоев 1 и 2 образца. Теплопроводность слоя вычисляли по изменению внутренней энергии последующих слоев. Результаты оценки коэффициента теплопроводности приведены на рис. 4.

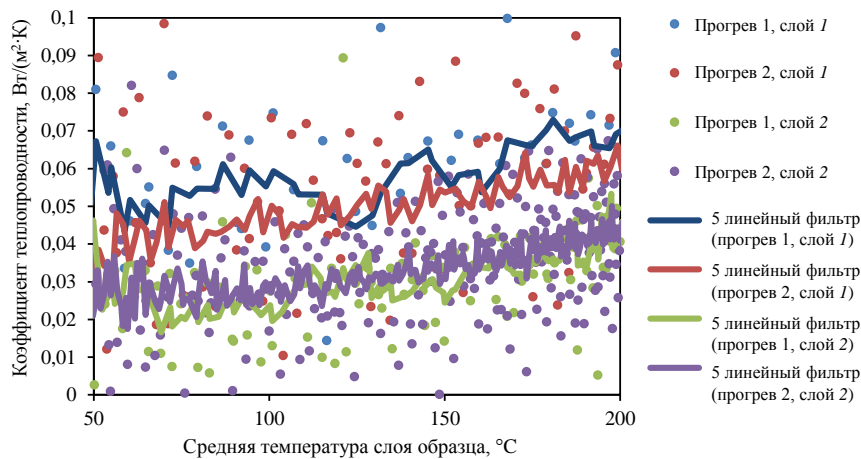


Рис. 4. Оценка коэффициента эффективной теплопроводности по участку «Прогрев образца»

Линейная фильтрация по пяти точкам достаточна для выявления зависимости коэффициента теплопроводности от температуры. Хорошо видно, что оценка теплопроводности для слоя 1 (самого горячего) образца заметно отличается от оценки теплопроводности для слоя 2. Это связано с тем, что оценка основывается на показателях толщины слоя образца (в идеальном случае слой имеет бесконечно малую толщину, >0). В реальности, разумеется, слои образца обладают толщиной, достаточной, чтобы градиент температур внутри слоя не был линейным. Соответственно, больший градиент температур на исследуемом слое вызывает большее искажение. Экспериментально

обнаружено, что увеличение градиента температур на слое повышает оценку коэффициента теплопроводности.

На рис. 5 представлена оценка коэффициента теплоотдачи (теплопоглощения) на горячей лицевой стороне образца по суммарному изменению его внутренней энергии по мере прохождения теплового фронта через образец.

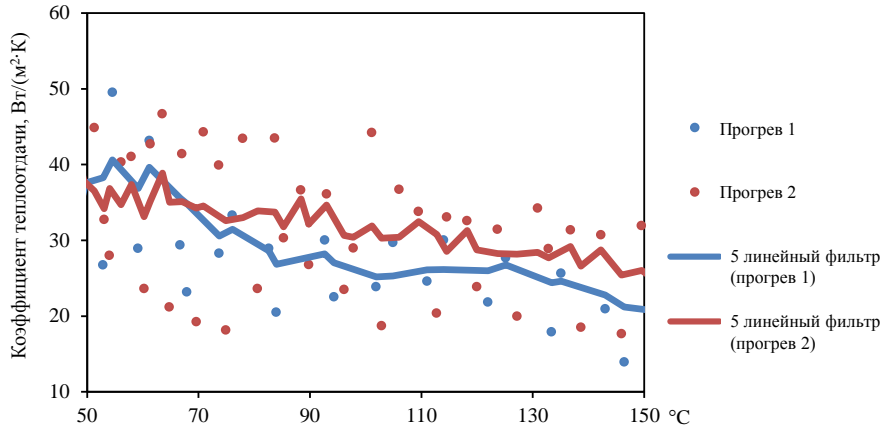


Рис. 5. Оценка коэффициента теплопоглощения (теплоотдачи) на горячей лицевой стороне образца

Небольшая тенденция к снижению коэффициента теплоотдачи связана с отсутствием учета тепловых потерь через боковые грани образца, которые увеличиваются по мере его прогрева. Учет тепловых потерь через боковые грани является одним из направлений продолжения работы.

Второй участок испытания, представляющий интерес для данной работы, – это участок свободного охлаждения образца. После выключения нагревателя печи образец снимали со стенда и регистрировали показания термодпар при остывании образца без его подогрева с какой-либо из сторон.

На этом участке оценивали теплопроводность слоев 1 и 4 (крайних слоев) по изменению внутренней энергии центральных (нагретых) слоев. На этом же участке оценивали теплоотдачу на холодной стороне образца.

На рис. 6 представлена оценка теплоотдачи на холодной стороне образца на заключительном этапе остывания. Оценки на более высоких температурах являются недостоверными ввиду отсутствия в исследовании учета тепловых потерь через боковые стороны образца.

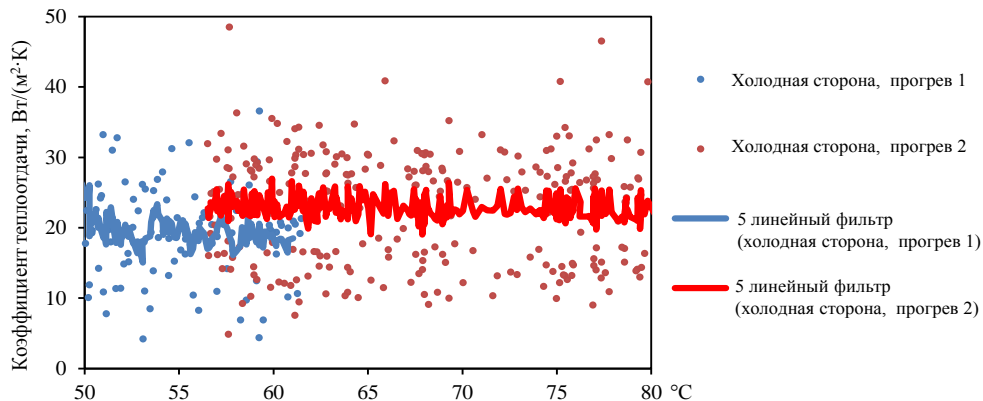


Рис. 6. Оценка коэффициента теплоотдачи на холодной лицевой стороне образца

На рис. 7 показана оценка коэффициента теплопроводности слоев 1 и 4 образца на этапе охлаждения ( $\Pi1_{\text{охл}}$  – при охлаждении, прогрев 1;  $\Pi2_{\text{охл}}$  – при охлаждении, прогрев 2). Представлены также результаты линейной фильтрации по 5 точкам.

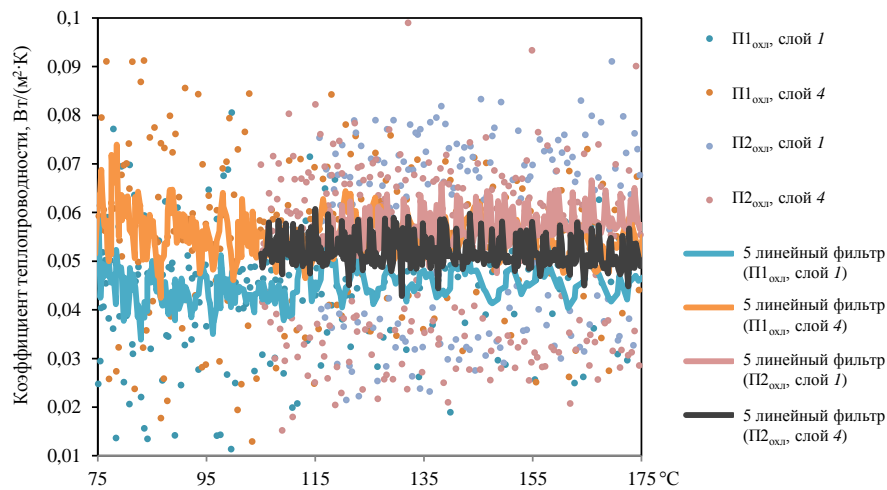


Рис. 7. Оценка коэффициента теплопроводности на этапе охлаждения

Оценки коэффициента теплопроводности при более высоких температурах являются недостоверными ввиду отсутствия учета тепловых потерь через боковые грани образца. Несмотря на большой разброс значений оценки коэффициента теплопроводности в конкретной точке, линейная фильтрация показателей позволяет получить достоверное значение.

На рис. 8 представлен сводный график оценок коэффициентов теплопроводности при различных режимах нагрева/охлаждения образцов. Коэффициент теплопроводности определен на слое в определенной ситуации ( $\Pi1_{\text{н}}$  – при нагреве, прогрев 1;  $\Pi2_{\text{н}}$  – при нагреве, прогрев 2;  $\Pi1_{\text{охл}}$  – при охлаждении, прогрев 1;  $\Pi2_{\text{охл}}$  – при охлаждении, прогрев 2). Представлена также линейная фильтрация по 5 точкам.

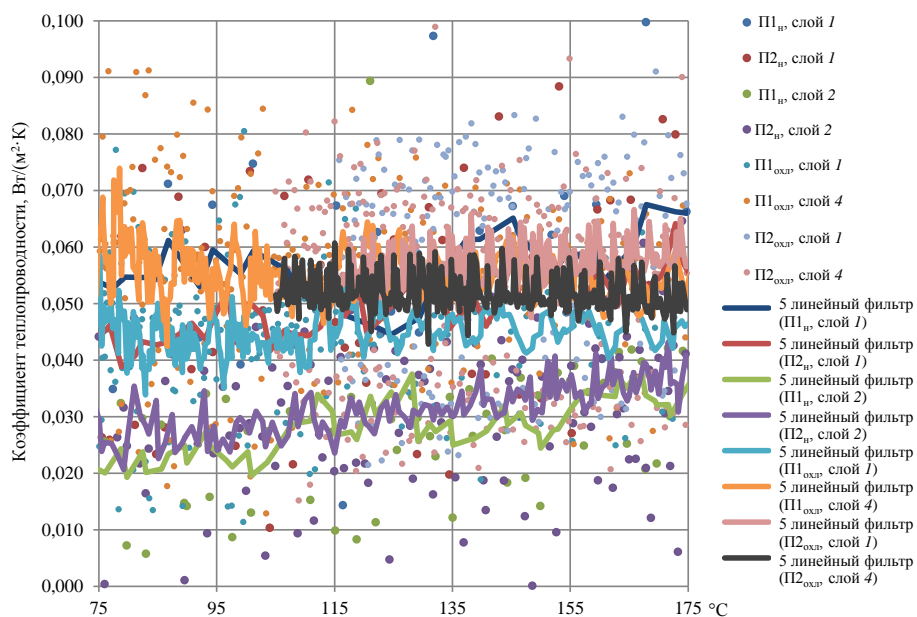


Рис. 8. Оценка коэффициента теплопроводности при различных режимах нагрева/охлаждения образцов (сводный график)

Большая часть оценок коэффициента теплопроводности при умеренных температурах (75–175 °С) находится в пределах 0,04–0,06 Вт/(м·К).

Для проверки достоверности оценки теплофизических свойств образца в электронных таблицах в Excel произведен расчет распространения теплового фронта через слоистый образец методом конечных элементов. В качестве заданных (граничных) условий приняты температура стенда и начальное состояние теплового фронта, а в качестве теплофизических характеристик материала – оценки, полученные при помощи стенда одностороннего нагрева. Геометрическая форма слоев в модели принята идентичной прогреваемым образцам.

В модели использованы следующие значения:

- коэффициент теплоотдачи на лицевых гранях образца: 28 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Его считали одинаковым для горячей и холодной лицевых граней;
- коэффициент теплопроводности образца при температуре 120 °С: 0,05 Вт/(м·К). Его принимали одинаковым для всех слоев;
- за удельную теплоемкость взяли табличную величину 1200 Дж/(кг·К); плотность образцов принимали равной 100 кг/м<sup>3</sup>, толщину слоев образца – равной 0,01 м.

На рис. 9 приводятся графики распространения теплового фронта через образец, полученные на стенде и при подстановке в модель теплофизических характеристик, установленных при анализе распространения теплового фронта (ТП<sub>печь</sub> – температура в объеме печи; С1–С5 – показания термопар в случае реального эксперимента (прогрев 1; аналогичные показания представлены на рис. 2 и 3); С1<sub>р</sub>–С5<sub>р</sub> – расчетные значения температур в соответствующих точках образца, полученные с помощью модели.

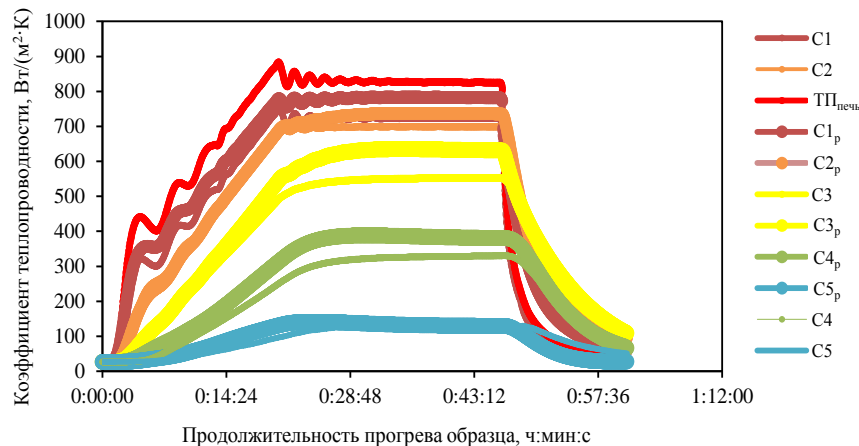


Рис. 9. Сравнительный анализ графиков распространения теплового фронта, полученных экспериментально и при помощи модели

Видно, что способ подстановки в модель теплофизических характеристик дает представление о распространении теплового фронта, близкое к реальному его распределению при одностороннем нагреве.

Совпадение поведения модели и реального объекта свидетельствует о правильности допущений, сделанных при построении теплофизической модели и ее применимости.

### Заключения

Проведена работа по оценке комплекса теплофизических свойств материала, достаточных для построения модели распространения теплового фронта через образец при его одностороннем нагреве.

Создана модель прохождения теплового фронта через материал. В качестве исходных данных использованы коэффициент теплопроводности материала, толщина слоев, плотность и теплоемкость материала, а также коэффициент теплоотдачи на поверхности образца.

Проведена работа по численной оценке коэффициента теплопроводности и коэффициента теплоотдачи на лицевых сторонах многослойного образца.

Подстановка полученных характеристик материала в модель позволила смоделировать прохождение теплового фронта и установление стационарного теплового потока через образец, а также остывание образца с приемлемой точностью.

Оценка теплофизических свойств материала признана достоверной.

Работа может быть продолжена в направлении повышения степени автоматизации оценки теплофизических характеристик образцов теплоизоляционных материалов, точности и расширения температурного диапазона оценок.

#### Список источников

1. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // Вестник РФФИ. 2017. № 3. С. 97–105.
2. Онищенко Г.Г., Каблов Е.Н., Иванов В.В. Научно-технологическое развитие России в контексте достижения национальных целей: проблемы и решения // Инновации. 2020. № 6 (260). С. 3–16.
3. Крайнов А.Ю. Основы теплопередачи. Теплопередача через слой вещества : учеб. пособие. Томск: СТУ, 2016. 48 с.
4. Байков В.И., Павлюкевич Н.В. Теплофизика: в 2 т. Минск: Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2013. Т. 1: Термодинамика, статистическая физика, физическая кинетика. 400 с.
5. Коротких А.Г. Теплопроводность материалов: учеб. пособие. Томск: Томск. политехн. ун-т, 2011. 97 с.
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. Баринов Д.Я., Мараховский П.С., Зуев А.В. Математическое моделирование деструкции теплозащитного материала на основе стеклопластика // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 71–78. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-71-78.
8. Барботько С.Л., Вольный О.С., Кириенко О.А., Шуркова Е.Н. Оценка пожаробезопасности полимерных материалов авиационного назначения / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2018. 408 с.
9. Барботько С.Л., Вольный О.С., Кириенко О.А., Шуркова Е.Н. Построение математической модели и расчет температур образцов при испытаниях на огнестойкость // Труды ВИАМ. 2017. № 7 (55). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-12-12.
10. Воробьев Н.Н., Баринов Д.Я., Зуев А.В., Пахомкин С.И. Расчетно-экспериментальное исследование эффективной теплопроводности волокнистых материалов // Труды ВИАМ. 2021. № 7 (101). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-95-102.
11. Баринов Д.Я., Просунцов П.В. Моделирование теплопереноса в слое разлагающегося материала теплозащитного покрытия спускаемого аппарата // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2016. № 6. С. 22–32. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-6-22-32.
12. Бельских Г.Н., Майоров А.В. Разработка высокоэффективных композиционных теплозащитных материалов // Инновации. 2014. № 9 (191). С. 118–120.
13. Аристова Е.Ю., Денисова В.А., Дрожжин В.С. и др. Композиционные материалы с использованием полых микросфер // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 1 (50). С. 52–57. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-52-57.

14. Гибкий теплозвукоизоляционный волокнистый материал низкой плотности: пат. 2641495 Рос. Федерация. № 2016142842; заявл. 01.11.16; опубл. 17.01.18.
15. Огнестойкий слоистый звуко теплоизолирующий материал: пат. 2465145 Рос. Федерация. № 2011118705/05; заявл. 11.05.11; опубл. 27.10.12.
16. Heat Insulation System: pat. 5246759 USA. No. 702269; filed 17.05.91; publ. 21.09.93.
17. Луговой А.А., Бабашов В.Г., Карпов Ю.В. Температуропроводность градиентного теплоизоляционного материала // Труды ВИАМ. 2014. № 2. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.03.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-2-02-02.
18. Стенд для качественной оценки теплоизоляционных материалов: пат. 156904 Рос. Федерация. № 2014138916; заявл. 25.09.14; опубл. 20.11.15.
19. 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). Ст. 11. URL: <http://www.jornal.viam.ru> (дата обращения 01.07.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-120-129.
20. 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). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 01.07.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-127-137.

#### References

1. Kablov E.N. Formation of domestic space materials science. *Vestnik RFFI*, 2017, no. 3, pp. 97–105.
2. Onishchenko G.G., Kablov E.N., Ivanov V.V. Scientific and technological development of Russia in the context of achieving national goals: problems and solutions. *Innovatsii*, 2020, no. 6 (260), pp. 3–16.
3. Krainov A.Yu. *Fundamentals of heat transfer. Heat transfer through a layer of matter: textbook*. Tomsk: STT, 2016, 48 p.
4. Baikov V.I., Pavlyukevich N.V. *Thermophysics: in 2 vols*. Minsk: Institute of Heat and Mass Transfer named after A.V. Lykov NAS of Belarus, 2013. Vol. 1: Thermodynamics, statistical physics, physical kinetics, 400 p.
5. Korotkikh A.G. *Thermal conductivity of materials: textbook*. Tomsk: Tomsk Polytech. University, 2011, 97 p.
6. Tomak V.I., Burkov A.S., Rytsarev A.M., Tovstonog V.A. Experimental assessment of the thermophysical characteristics of high-temperature heat-insulating materials. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser.: Natural sciences*, 2020, no. 2, pp. 99–116. DOI: 10.18698/1812-3368-2020-2-99-116.
7. Barinov D.Ya., Marakhovskij P.S., Zuev A.V. Mathematical modeling of destruction of fiberglass-based thermal-protection material. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 71–78. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-71-78.
8. Barbotko S.L., Volny O.S., Kirienko O.A., Shurkova E.N. *Evaluation of fire safety of polymeric materials for aviation purposes*. Ed. E.N. Kablov. M.: VIAM, 2018, 408 p.
9. Barbotko S.L., Volny O.S., Kiriyenko O.A., Shurkova E.N. Creation of the mathematical model and calculation of sample temperatures at tests on fire resistance. *Trudy VIAM*, 2017, no. 7 (55), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 7, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-12-12.
10. Vorobev N.N., Barinov D.Ya., Zuev A.V., Pakhomkin S.I. Computational and experimental study of the effective thermal conductivity of fibrous materials. *Trudy VIAM*, 2021, no. 7 (101), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 07, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-95-102.
11. Barinov D.Ya., Prosuntsov P.V. Modeling of heat transfer in the layer of decomposing material of the heat-shielding coating of the descent vehicle. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser.: Mechanical engineering*, 2016, no. 6, pp. 22–32. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-6-22-32.

12. Belskikh G.N., Maiorov A.V. Development of highly efficient composite heat-shielding materials. *Innovatsii*, 2014, no. 9 (191), pp. 118–120.
13. Aristova E.Yu., Denisova V.A., Drozhzhin V.S. et al. Composite materials using hollow microspheres. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 1 (50), pp. 52–57. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-52-57.
14. *Flexible heat and sound insulating fibrous material of low density*: pat. 2641495 Rus. Federation, no. 2016142842; filed 01.11.16; publ. 17.01.18.
15. *Fire-resistant layered sound and heat insulating material*: pat. 2465145 Rus. Federation, no. 2011118705/05; filed 11.05.11; publ. 27.10.12.
16. *Heat Insulation System*: pat. 5246759 USA, no. 702269; filed 17.05.91; publ. 21.09.93.
17. Lugovoy A.A., Babashov V.G., Karpov Yu.V. The thermal diffusivity of the gradient thermal insulation material. *Trudy VIAM*, 2014, no. 2, paper no. 02. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: March 2, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-2-2-2.
18. *Stand for the qualitative assessment of heat-insulating materials*: pat. 156904 Rus. Federation, no. 2014138916; заявл. 25.09.14; опубл. 20.11.15.
19. 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. 1 (66), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 1, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-129-142.
20. 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), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 1, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-127-137.

#### *Информация об авторах*

**Бутаков Вячеслав Владимирович**, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Луговой Алексей Алексеевич**, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Варрик Наталья Мироновна**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Бабашов Владимир Георгиевич**, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

#### *Information about the authors*

**Vyacheslav V. Butakov**, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Aleksey A. Lugovoy**, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Natalia M. Varrik**, Lead Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

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

Статья поступила в редакцию 20.06.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 23.06.2022.

The article was submitted 20.06.2022; approved and accepted for publication after reviewing 23.06.2022.