



УДК 66.045.3

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-2-2-2

## **ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬ ГРАДИЕНТНОГО ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА**

А.А. Луговой

В.Г. Бабашов

Ю.В. Карпов

**Февраль 2014**

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

*А.А. Луговой, В.Г. Бабаиов, Ю.В. Карпов*

## ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬ ГРАДИЕНТНОГО ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

*Исследовали особенности прохождения температурного фронта через ряд однослойных и многослойных теплоизоляционных материалов с различной плотностью. Представлены графики движения температурного фронта через объем волокнистого материала при одностороннем нагреве при 1200 и 1590°C. Установлено влияние порядка расположения слоев различной плотности на эффективность теплоизоляции. Проведена качественная оценка эффективности теплоизоляционного материала в условиях одностороннего нагрева.*

**Ключевые слова:** теплоизоляция, гибкий волокнистый материал, теплопроводность, теплоизоляционный материал.

*A.A. Lugovoy, V.G. Babashov, U.V. Karpov*

## THE THERMAL DIFFUSIVITY OF THE GRADIENTTHERMAL INSULATION MATERIAL

*The features of the temperature front passing through a series of single-layer and multi-layer insulation materials with different densities. Presented schedules temperature front through the bulk fibrous material in unilateral heating at 1200 and 1590°C. The effect of the order of layers of different density on the effectiveness of insulation. A qualitative assessment of the effectiveness of thermal insulation material in a one-sided heating.*

**Keywords:** insulation, flexible fibrous material, thermal diffusivity, thermal insulation materials.

В настоящее время для теплоизоляции тепловых агрегатов все чаще используются волокнистые теплоизоляционные материалы (ТИМ), выгодно отличающиеся низкой теплопроводностью, высокими температурами эксплуатации, химической инертностью и низкой плотностью [1, 2]. Известно, что футеровка тепловых агрегатов волокнистыми материалами позволяет в 2–2,5 раза снизить массу печи, в 2 раза снизить инерционность, на 25–50% уменьшить затраты энергии [3–9].

В промышленности широко представлены различные виды волокнистых теплоизоляционных материалов, различающихся видом исходных минеральных волокон. Основными характеристиками теплоизоляционных материалов являются их максимальная рабочая температура и коэффициент теплопроводности.

По уровню температур высокотемпературные изоляционные материалы можно разделить на четыре группы:

- с максимальной рабочей температурой до 700°C. К ним относятся многие строительные и теплотехнические изоляции общего назначения, органические и неорганические: минеральная вата, стекловата, ячеистые бетоны, пеностекло, асбестовые, каолиновые и другие теплоизоляционные изделия;

- огнеупорные, волокнистые и засыпные изоляции с максимальной рабочей температурой до 1750°C, главным образом на основе оксидной керамики из  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{ZrSiO}_4$ , шамотные и динасовые легковесные изделия;

- высокоогнеупорные пористые изоляции с предельной рабочей температурой до 2300–2500°C – из корунда, магнезита, хромомагнезита и диоксида циркония, а также из высокоогнеупорных оксидов бериллия, иттрия, скандия и др.;

- особо высокотемпературные изоляции с предельной рабочей температурой >2500°C. Изоляции этой группы изготовляют из углеграфитовых материалов, на основе тугоплавких металлов и их соединений и сплавов, а также из некоторых оксидов:  $\text{ThO}_2$ ,  $\text{HfO}_2$  [10–18].

Следствием наличия большого ассортимента волокон и волокнистых материалов стало использование в качестве футеровки для высокотемпературных печей многослойной волокнистой теплоизоляции. При этом при выборе количества и состава слоев теплоизоляции учитывались только температура эксплуатации материала и технико-экономические показатели установки. Так, в зону с высокой температурой устанавливается более дорогой и жаростойкий материал, в зону с более низкой температурой – более дешевый материал.

Исследования теплофизических свойств ряда волокнистых материалов показали, что можно оптимизировать подбор материалов по слоям, основываясь не только на составе материала, но и на его плотности как характеристики, напрямую влияющей на теплопроводность. Подобрав материал на основе одного вида волокон, но разной плотности, можно оптимизировать свойства теплоизоляции сразу по нескольким параметрам. Из зависимости коэффициента теплопроводности от плотности волокнистого теплоизоляционного материала на основе волокон оксида алюминия следует, что более

плотный материал имеет более низкие значения коэффициента теплопроводности в области температур выше 1000–1200°C, а низкоплотные материалы имеют минимум значений теплопроводности при температурах ниже 800–900°C [19]. Таким образом, первым шагом к оптимизации структуры теплоизоляции высокотемпературной энергетической установки является применение двухслойного материала, более плотной стороной обращенного к горячей зоне.

Особенности поведения многослойных и двухслойных теплоизоляционных материалов можно выявить, изучая процесс изменения температуры в многослойном материале при одностороннем нагреве.

### Экспериментальная установка

Эксперименты проводили на нестандартном испытательном стенде с односторонним расположением силитовых нагревателей. Схема рабочей части стенда приведена на рис. 1. Источником теплового потока являются силитовые нагреватели, расположенные в нижней части рабочего пространства над подом и изолированные со всех сторон, кроме верхней части. Над нагревателями устанавливается защитная маска, в которой вырезано окно для образца размером 100×100 мм. На это окно сверху накладывается образец гибкого ТИМ, размеры которого превышают размеры окна, причем для максимального приближения к условиям одностороннего нагрева вся боковая поверхность ТИМ также изолируется. На верхнюю поверхность образца помещается алюминиевая пластина.

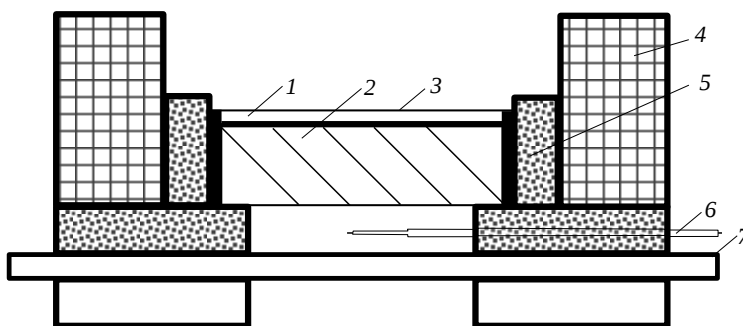


Рисунок 1. Схема рабочей зоны испытательного стенда:

1 – металлическая (алюминиевая) пластина; 2 – образец испытываемого материала; 3 – термопара «холодной» стороны; 4 – теплоизоляция стенда; 5 – защитная маска; 6 – термопара «горячей» стороны; 7 – силитовые нагреватели

Расстояние между силитовыми нагревателями и «горячей» поверхностью образца составляет 50 мм. Измерение и регулирование температуры производится с помощью термоэлектрических датчиков, расположенных на горячей поверхности ТИМ (у нагревателей), на металлической пластине и внутри образца ТИМ. Показания всех датчиков

фиксируются с помощью контрольно-следящего прибора типа PMT 39-DM, сопряженного с компьютером.

Образцы ТИМ квадратной формы с размером стороны  $130 \pm 10$  мм и толщиной  $50 \pm 2$  мм вырезали из волокнистых матов: либо из одного мата толщиной 50 мм, либо набирали послойно из матов толщиной 5, 10 или 15 мм.

В ходе эксперимента испытываемый образец нагревали до температуры  $1200^\circ\text{C}$  и выдерживали до момента установления стационарного теплового потока (прекращение роста температуры на «холодной» стороне образца).

Также возможно проводить испытания при температуре  $1590^\circ\text{C}$ , что является максимально достижимой температурой на данном стенде. Продолжительность выдержки при максимальной температуре не превышает 6–10 мин, что обусловлено техническими возможностями установки и не позволяло добиться установления стационарного теплового потока.

На «холодной» поверхности образца ТИМ располагали металлическую пластину из алюминиевого сплава, температуру которой измеряли термоэлектрическим датчиком. Из различных способов обеспечения теплового контакта термопары с поверхностью алюминиевой пластины (винтовое крепление, зачеканивание спая в отверстие на пластине, помещение спая в расплав капли олова на пластине) оптимальным оказалось прижатие спая термопары к пластине с помощью груза.

### Результаты экспериментов

В качестве эталонных использовали образцы жесткого материала с плотностью  $140 \text{ кг/м}^3$  с известной теплопроводностью. Изменение температуры на холодной стороне образца в зависимости от продолжительности нагрева представлено на рис. 2.

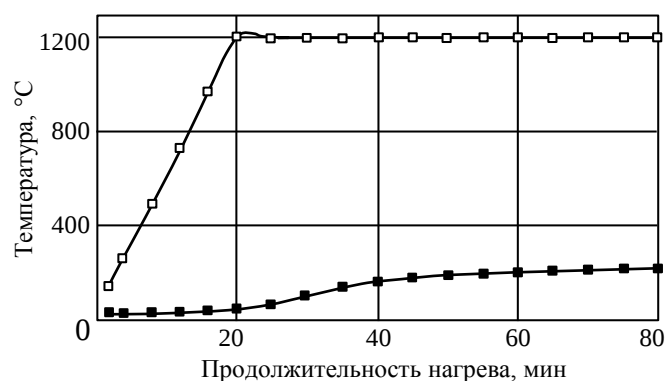


Рисунок 2. Режим испытания образцов на испытательном стенде (□) при падении температуры в волокнистом кварцевом материале (■)

Установка выходила на температуру выдержки в течение 20 мин, к этому времени температура на «холодной» стороне ТИМ увеличивалась незначительно. После выхода на температуру выдержки температура на «холодной» стороне образца медленно росла (в течение 35–40 мин), затем установилась на одном уровне (небольшой рост температуры в пределах погрешности измерений).

Исследовались образцы с различной плотностью, полученные методом вакуумного формования из волокнистой пульпы после гомогенизации на миксерной мешалке [1, 2]. Полные режимы испытания однослойного гибкого материала с плотностью  $120 \text{ кг/м}^3$  и многослойного материала с расположением слоев по возрастанию плотности в направлении стороны с высокой температурой представлены на рис. 3.

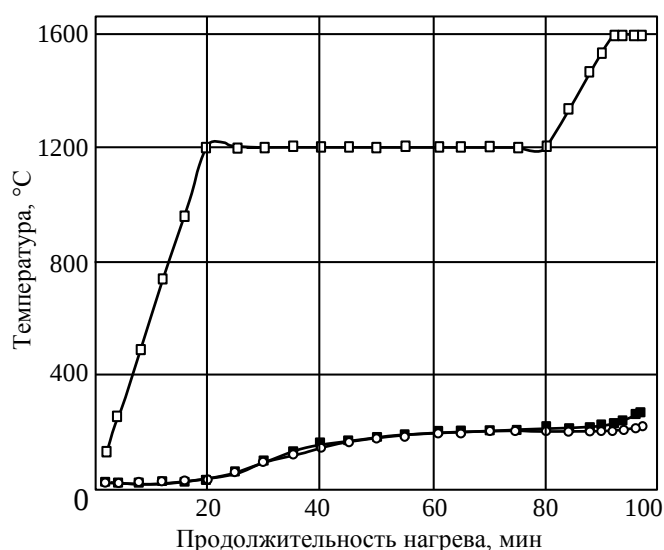


Рисунок 3. Полные режимы испытания (□ – температура «горячей» стороны) однослойного гибкого материала (■) и многослойного материала (○) на испытательном стенде

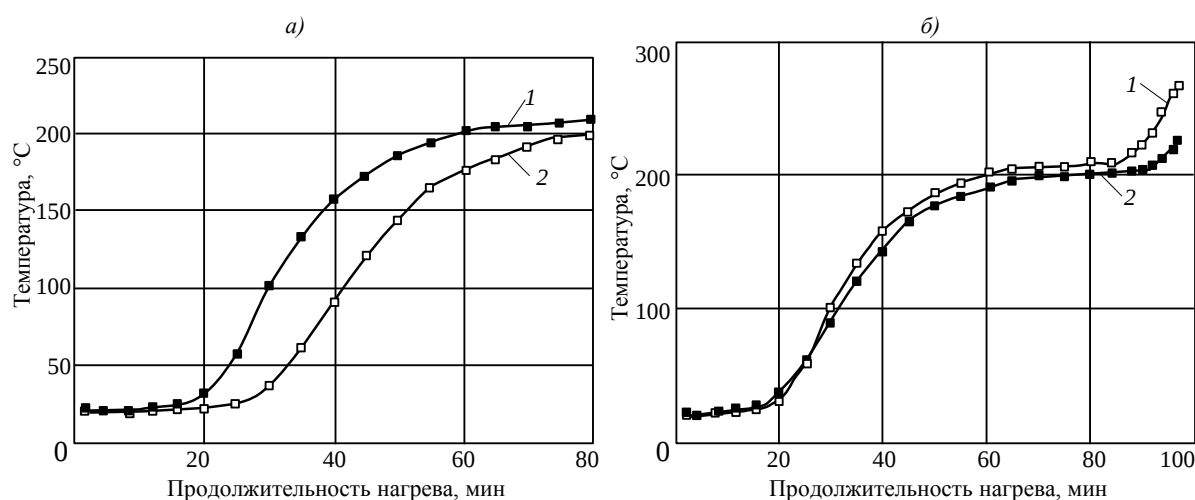


Рисунок 4. Изменение температур на «холодной» стороне образца для однослойного (1) и градиентного материалов (2) при температурах 1200 (а) и 1590°C (б)

Наибольший интерес представляло поведение многослойного образца с уменьшением градиента плотности по направлению к «холодной» стороне. Измерена разница температур при длительной выдержке при температуре 1200°C при установившемся тепловом потоке на «холодной» пластине при исследовании волокнистого материала с плотностью  $\sim 100 \text{ кг/м}^3$  и образца градиентного материала со средней плотностью 170–200  $\text{кг/м}^3$  (рис. 4, а).

Результаты сравнения температур на «холодной» стороне однородного и градиентного образцов при максимальной температуре 1590°C приведены на рис. 4, б. Как упоминалось выше, так как продолжительность выдержки при максимальной температуре незначительна, то установления режима стационарного теплового потока достичь не удалось.

### **Обсуждение результатов**

В работе [20] представлены результаты исследования теплопроводности различных волокнистых материалов. На основании зависимостей коэффициента теплопроводности  $\lambda$  от температуры и плотности материала можно сделать вывод, что менее плотные материалы в области температур ниже 1000–1200°C имеют  $\lambda$  более низкий, чем более плотные. В области температур выше 1200°C коэффициент теплопроводности более плотных материалов ниже, чем у менее плотных. Установлено, что в зоне относительно более низких температур менее плотные материалы работают лучше в качестве теплоизоляционных, а в зоне более высоких температур лучше работают более плотные материалы.

Использование материала, имеющего градиент плотности в направлении более горячей стороны (состоящий из слоев различной плотности и, возможно, состава), позволит: оптимизировать состав теплоизоляции; уменьшить стоимость материала благодаря использованию более дешевых материалов в качестве низкотемпературных слоев. Возможно также использование слоев материалов с иными, например, радиофизическими свойствами. Исследование свойств подобных материалов будет предметом дальнейших испытаний.

Результаты, полученные в ходе исследования разницы температур однослойных и градиентных материалов, показывают, что до 1000–1100°C значения температуры на «холодной» пластине близки для разных видов материалов, имеющиеся различия (5–15°C) можно объяснить погрешностями эксперимента и несовершенством методики.

При возрастании температуры до 1590°C и незначительной выдержке при этой температуре разница в значениях температуры на пластине с «холодной» стороны вы-

росла до 50–60°C и, видимо, продолжала бы возрастать по мере приближения к режиму установившегося теплового потока.

Таким образом, использование градиентного материала в качестве теплоизоляционного позволит оптимизировать материал по толщине и плотности слоев. Уменьшение плотности высокотемпературных волокон на основе оксида алюминия в составе ТИМ позволит снизить стоимость материала. Использование слоистой структуры позволит использовать в менее горячих зонах слои, изготовленные из более дешевых видов волокон, а также слои материала, обладающие заданными свойствами (например, радиофизическими), что позволит в дальнейшем создать multifunctional теплоизоляцию.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Способ получения неорганического волокнистого материала: пат. 2213074 Рос. Федерация; опубл. 27.09.2003.
2. Производство формованного продукта на основе волокна оксида алюминия: пат. 5319949 Япония; опубл. 03.12.1993.
3. <http://www.rusmet.ru> / 12.08.11 /Инновационные материалы. 2011.
4. Janssen R. Reaction Formed Alumina-Alumina FRCMC /In: 7th International Conference on High Temperature Ceramic Matrix Composites (HT-CMC 7), 20–22 сентября, 2010. Байройт. 2010. С. 398–414.
5. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
6. Гращенков Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 231–242.
7. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В. Методы получения монокристаллических волокон оксида алюминия для композиционных материалов /В сб. материалов 29-ой ежегодной Международной конф. и семинара «Композиционные материалы в промышленности» 1–5 июня 2009 г. Ялта. 2009. С. 150–155.
8. Милейко С.Т., Серебряков А.В., Кийко В.М., Колчин А.А., Курлов В.Н., Новохатская Н.И., Толстун А.Н. Монокристаллические волокна муллита, получаемые методом внутренней кристаллизации //Композиты и наноструктуры. 2009. №2. С. 47–60.
9. Щетанов Б.В., Купцов Р.С., Свистунов В.И. Методы получения монокристаллических волокон оксида алюминия для создания композиционных материалов и вы-

- сокотемпературной волоконной оптики //Труды ВИАМ. 2013. №4. Ст. 01 (viam-works.ru).
10. Балинова Ю.А. Непрерывные поликристаллические волокна оксида алюминия для композиционных материалов: Автореф. дис. к.т.н. М.: ВИАМ. 2012. 20 с.
  11. Кац С.М. Высокотемпературные теплоизоляционные материалы. М.: Metallurgia. 1981. 232 с.
  12. Способ получения волокнистого теплоизоляционного материала: пат. 2433917 Рос. Федерация; опубл. 20.11.2011.
  13. Ивахненко Ю.А., Бабашов В.Г., Зимичев А.М., Тинякова Е.В. Высокотемпературные теплоизоляционные и теплозащитные материалы на основе волокон тугоплавких соединений //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 380–385.
  14. Каблов Е.Н., Ивахненко Ю.А., Балинова Ю.А., Семенова Е.В. Волокна диоксида циркония для нового поколения материалов авиации и космоса /В сб. материалов 25-ой юбилейной Международной конф. и выставки «Композиционные материалы в промышленности». Ялта: Мир композитов. 2005. С. 320–323.
  15. Тинякова Е.В., Гращенков Д.В. Теплоизоляционный материал на основе муллит-корундовых и кварцевых волокон //Авиационные материалы и технологии. 2012. №3. С. 43–46.
  16. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Ивахненко Ю.А., Балинова Ю.А. Перспективные армирующие высокотемпературные волокна для металлических и керамических композиционных материалов //Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 05 (viam-works.ru).
  17. Гращенков Д.В., Балинова Ю.А., Тинякова Е.В. Керамические волокна оксида алюминия и материалы на их основе //Стекло и керамика. 2012. №4. С. 32–36.
  18. Щетанов Б.В., Балинова Ю.А., Люлюкина Г.Ю., Соловьева Е.П. Структура и свойства непрерывных поликристаллических волокон  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 13–17.
  19. <http://www.izomat.ru/> Шабурова Т.А. Изоляционные материалы, выпускаемые ЗАО «ИЗОМАТ» (2008 г.).
  20. Грибков В.Н., Мизюрина Г.Т., Щетанов Б.В., Ляпин В.В. Возможности волокнистой тепловой защиты /В сб. трудов первой Международной авиакосмической конф. «Человек–Земля–Космос». Т. 5. «Материалы и технология производства авиакосмических систем». М.: Военная академия им. Ф.Э. Дзержинского. 1995. С. 223–231.

## References list

1. Sposob poluchenija neorganicheskogo voloknistogo materiala [Way of receiving an inorganic fibrous material]: pat. 2213074 Ros. Federacija; opubl. 27.09.2003.
2. Proizvodstvo formovannogo produkta na osnove volokna oksida aljuminija. [Production of the formed product on the basis of fiber of oxide of aluminum]: pat. 5319949 Japonija; opubl. 03.12.1993.
3. <http://www.rusmet.ru> / 12.08.11 /Innovacionnye materialy [Innovative materials ]. 2011.
4. Janssen R. Reaction Formed Alumina-Alumina FRCCMC /In: 7th International Conference on High Temperature Ceramic Matrix Composites (HT-CMC 7), 20–22 sentjabrja, 2010. Bajrojt. 2010. S. 398–414.
5. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
6. Grashhenkov D.V., Chursova L.V. Strategija razvitija kompozicionnyh i funkcional'nyh materialov [Strategy of development of composite and functional materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 231–242.
7. Kablov E.N., Shhetanov B.V. Metody poluchenija monokristallicheskih volokon oksida aljuminija dlja kompozicionnyh materialov [Methods of receiving single-crystal fibers of oxide of aluminum for composite materials] /V sb. materialov 29-oj ezhegodnoj Mezhdunarodnoj konf. i seminaru «Kompozicionnye materialy v promyshlennosti» 1–5 ijunya 2009 g. Jalta. 2009. S. 150–155.
8. Milejko S.T., Serebrjakov A.V., Kijko V.M., Kolchin A.A., Kurlov V.N., Novohatskaja N.I., Tolstun A.N. Monokristallicheskie volokna mullita, poluchaemye metodom vnutrennej kristallizacii [The single-crystal fibers of mullite received by a method of internal crystallization] //Kompozity i nanostruktury. 2009. №2. S. 47–60.
9. Shhetanov B.V., Kupcov R.S., Svistunov V.I. Metody poluchenija monokristallicheskih volokon oksida aljuminija dlja sozdaniya kompozicionnyh materialov i vysokotemperaturnoj volokonnoj optiki [Methods of receiving single-crystal fibers of oxide of aluminum for creation of composite materials and high-temperature fiber optics] //Trudy VIAM. 2013. №4. St. 01 (viam-works.ru).
10. Balinova Ju.A. Nepreryvnye polikristallicheskie volokna oksida aljuminija dlja kompozicionnyh materialov [Continuous polycrystalline fibers of oxide of aluminum for composite materials]: Avtoref. dis. k.t.n. M.: VIAM. 2012. 20 s.

11. Kac S.M. Vysokotemperaturnye teploizoljacionnye materialy [High-temperature heat-insulating materials]. M.: Metallurgija. 1981. 232 s.
12. Sposob poluchenija voloknistogo teploizoljacionnogo materiala [Way of receiving a fibrous heat-insulating material]: pat. 2433917 Ros. Federacija; opubl. 20.11.2011.
13. Ivahnenko Ju.A., Babashov V.G., Zimichev A.M., Tinjakova E.V. Vysokotemperaturnye teploizoljacionnye i teplozashhitnye materialy na osnove volokon tugoplavkih soedinenij [High-temperature heat-insulating and heat-shielding materials on the basis of fibers of refractory connections] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 380–385.
14. Kablov E.N., Ivahnenko Ju.A., Balinova Ju.A., Semenova E.V. Volokna dioksida cirkonija dlja novogo pokolenija materialov aviatsii i kosmosa [Fibers of dioxide of zirconium for new generation of materials of aircraft and space] /V sb. materialov 25-oj jubilejnoj Mezhdunarodnoj konf. i vystavki «Kompozicionnye materialy v promyshlennosti». Jalta: Mir kompozitov. 2005. S. 320–323.
15. Tinjakova E.V., Grashhenkov D.V. Teploizoljacionnyj material na osnove mullitokorundovykh i kvarcevykh volokon [Heat-insulating material on a basis the mullitokorundovykh and quartz fibers] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №3. S. 43–46.
16. Kablov E.N., Shhetanov B.V., Ivahnenko Ju.A., Balinova Ju.A. Perspektivnye armirujushhie vysokotemperaturnye volokna dlja metallicheskih i keramicheskikh kompozicionnykh materialov [Perspective reinforcing high-temperature fibers for metal and ceramic composite materials] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 05 (viam-works.ru).
17. Grashhenkov D.V., Balinova Ju.A., Tinjakova E.V. Keramicheskie volokna oksida aljuminija i materialy na ih osnove [Ceramic fibers of oxide of aluminum and materials on their basis] //Steklo i keramika. 2012. №4. S. 32–36.
18. Shhetanov B.V., Balinova Ju.A., Ljuljukina G.Ju., Solov'eva E.P. Struktura i svojstva nepreryvnykh polikristallicheskih volokon  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [Structure and properties of continuous polycrystalline fibers  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 13–17.
19. <http://www.izomat.ru/> Shaburova T.A. Izoljacionnye materialy, vypuskaemye ZAO «IZOMAT» [The materials released by JSC IZOMAT] (2008 g.).
20. Gribkov V.N., Mizjurina G.T., Shhetanov B.V., Ljapin V.V. Vozmozhnosti voloknistoj teplovoj zashhity [Possibilities of fibrous thermal protection] /V sb. trudov pervoj Mezhdunarodnoj aviakosmicheskoy konf. «Chelovek–Zemlja–Kosmos». T. 5. «Materialy i tehnologija proizvodstva aviakosmicheskikh sistem». M.: Voennaja akademija im. F.Je. Dzerzhinskogo. 1995. S. 223–231.