

УДК 662.998

## **АНАЛИЗ СВОЙСТВ И ОСОБЕННОСТЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВЫСОКОПОРИСТЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ БАЗАЛЬТОВОГО ВОЛОКНА**

**В.А. Тарасов, М.П. Тимофеев, Ю.В. Ермакова, Р.В. Боярская**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация  
e-mail: cm12@sm.bmstu.ru; tarasov\_va@mail.ru; sm5-3@yandex.ru;  
julia.kuchina9@gmail.com

*Представлены результаты экспериментального исследования свойств и особенностей функционирования высокопористых теплоизоляционных материалов, полученных методом фильтрационного осаждения. Показано, что эффективность теплоизоляции высокопористых материалов увеличивается с ростом пористости и толщины стенки теплоизолирующих конструкций. Установлено, что для каждого типа теплоизоляционного материала существует критическая температура, выше которой развивается интенсивная усадка. Для наполнителей из базальтовых, кварцевых и каолиновых волокон установлено значение допустимой температуры горячей стенки. Предложена математическая модель, описывающая стационарный режим теплопередачи в высокопористых теплоизоляционных материалах с учетом теплового излучения Стефана–Больцмана в поровое пространство. На основе экспериментальных исследований определена эмпирическая константа в нелинейном уравнении теплопроводности, учитывающая многократное взаимодействие потока теплового излучения между смежными волокнами наполнителя. Предложено соотношение для проектного расчета толщины стенки теплоизолирующей конструкции по требуемому перепаду температур горячей и холодной стенок.*

**Ключевые слова:** высокопористый теплоизоляционный материал, метод фильтрационного осаждения, стационарный режим теплопередачи, коэффициент теплопроводности высокопористой композиционной структуры.

## **ANALYSIS OF PROPERTIES AND PECULIARITIES OF FUNCTIONING OF HIGHLY POROUS HEAT-INSULATING MATERIALS BASED ON BASALT FIBER**

**V.A. Tarasov, M.P. Timofeev, Yu.V. Yermakova, R.V. Boyarskaya**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation  
e-mail: cm12@sm.bmstu.ru; tarasov\_va@mail.ru; julia.kuchina9@gmail.com

*The results of experimental study of properties and peculiarities of functioning of the porous heat-insulating materials, produced using the method for filtration deposition, are presented. It is shown that the thermal insulation efficiency of highly porous materials increases as the porosity and the wall thickness of heat-insulating constructions grow. It is found, that for each type of the heat-insulating material, there is a critical temperature above which the intensive shrinkage develops. A value of the permissible temperature of the hot wall is set for fillers made of basalt, quartz,*

*and kaolin fibers. The mathematical model describing a stationary regime of heat transfer in highly porous heat-insulating materials with consideration for the Stefan–Boltzmann thermal radiation in the pore space is proposed. On the basis of experimental study, the empirical constant in the nonlinear equation of heat conduction is determined, which takes into account the multiple interaction of thermal radiation flows between adjacent fibers of the filler. The relationship for calculation of wall thickness of the heat-insulating construction using the desired temperature difference between the hot and cold walls is proposed.*

**Keywords:** highly porous heat-insulating material, method of filtration deposition, stationary heat-transfer regime, coefficient of thermal conductivity of highly porous composite structure.

Одним из актуальных направлений развития машиностроения является производство конструкций из высокопористых теплоизоляционных материалов (ТИМ), которые используются в широком диапазоне температур и выдерживают механические, радиационные и другие нагрузки. В ракетно-космической технике [1] такие материалы необходимы для обеспечения теплового режима криогенных емкостей, жилых и приборных отсеков, головных обтекателей, трубопроводов, двигательных установок.

Особенности функционирования ТИМ, которые относятся к классу композитов, определяются выбором наполнителя и связующего, структурой материала и технологией изготовления. Используется широкая гамма наполнителей: коротковолокниты из базальта, кварца, каолина, стеклянные микросферы и др. Связующие подбирают, исходя из условий эксплуатации изделий. Так, для обеспечения экологичности используют глиноземы на основе оксида алюминия, а для обеспечения прочности — полимерные связующие. При этом тип полимера определяется температурой эксплуатации материала.

Настоящая статья посвящена принципиальным вопросам конструктивно-технологической отработки теплоизолирующих конструкций:

- анализу возможности функционирования материала в стационарном режиме;
- назначению толщины стенки с учетом теплофизических свойств ТИМ и параметров тепловых потоков.

В основе снижения кондуктивного теплообмена в ТИМ лежит обеспечение их значительной пористости (70...90%). Управление этой характеристикой материала достигается [2] с помощью применения технологии фильтрационного осаждения с подпрессовкой (рис. 1).

Суть технологии состоит в том, что формирование изделия происходит [3] путем обезвоживания гидромассы (пульпы), содержащей коротковолокниты и глинозем, через перфорированные стенки прессформы с одновременным вакуумированием рабочей зоны и подпрессовкой заготовки до заданной плотности материала. Метод позволяет обеспечить стабильность теплофизических и физико-механических

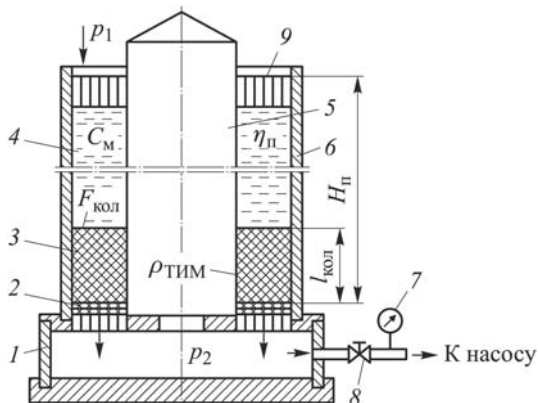


Рис. 1. Схема формообразования теплоизолирующих колец из высокопористого материала методом фильтрационного осаждения пульпы;  $l_{\text{КОЛ}}$ ,  $F_{\text{КОЛ}}$  — длина и площадь теплоизолирующего кольца на основе базальтовых волокон;  $H_{\text{П}}$  — высота столбца пульпы;  $p_1$  — естественное или искусственное внешнее давление на пулпу;  $p_2$  — давление в вакуумируемой полости приспособления: 1 — камера; 2 — перегородка перфорированная; 3 — слой осадка ТИМ; 4 — пулпа; 5 — оправка; 6 — корпус (труба); 7 — вакуумметр; 8 — вентиль запорный; 9 — пуансон

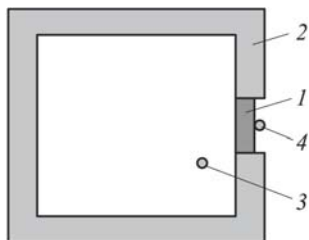


Рис. 2. Схема проведения тепловых исследований образцов ТИМ в муфельной печи

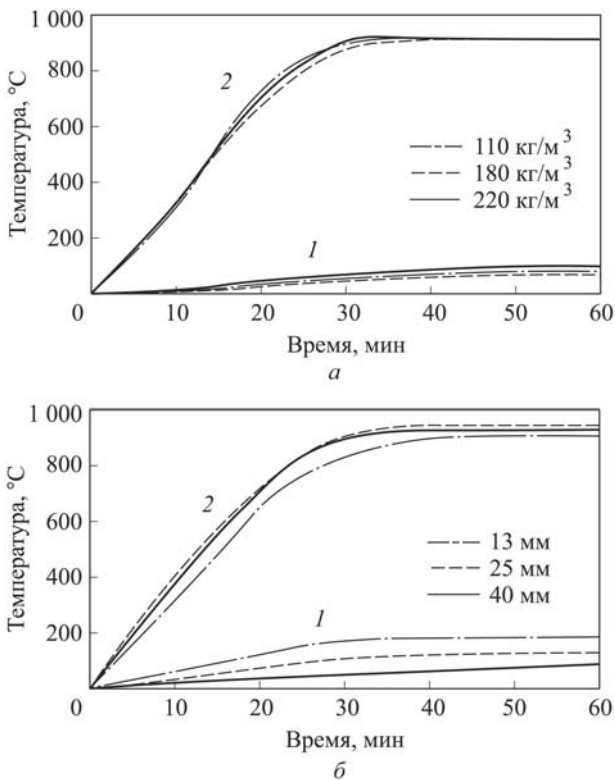
характеристик изделия, что особенно важно при их использовании в ракетно-космической технике.

К особенностям функционирования теплоизолирующих конструкций следует отнести зависимости теплопроводности ТИМ от его плотности и толщины стенки конструкции, а также от усадки материала при его нагревании. Для их установления были изготовлены образцы

различной плотности и толщины. Экспериментальные исследования проводились по схеме, приведенной на рис. 2. Образцы 1 устанавливались в стенке муфельной печи 2 и нагревались с помощью электротермической установки. Температуры горячей (3) и холодной (4) стенок образца измерялись соответственно с помощью хромель-алюмелевых термопар, заключенных в медный диск диаметром 5 мм и толщиной 2 мм.

Результаты экспериментов представлены на рис. 3. Толщина образцов, представленных на рис. 3, а, составляла 40 мм. Температура нагрева горячей стенки образцов — 930 °С. При этом температура холодной стенки составила 105, 93 и 84 °С в зависимости от плотности материала. Время роста температуры горячей стенки исследуемых образцов для всех плотностей составляет в среднем 30 мин, т.е. скорость нагрева горячей стенки образца была одинакова.

Влияние толщины образцов на характер изменения температуры холодной стенки показано на рис. 3, б.



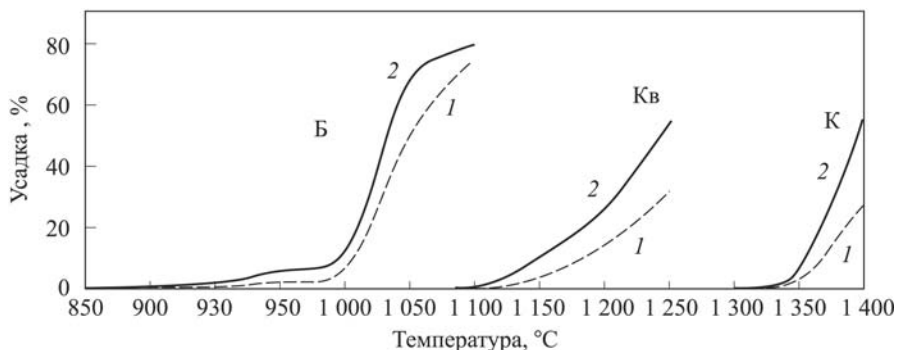
**Рис. 3. Зависимость температуры стенок образцов разной плотности (а) и толщины (б) от времени испытания:**

*1* — температура холодной стенки; *2* — температура горячей стенки

В результате анализа выявили, что после выхода температуры горячей стенки на стационарный режим с задержкой во времени стабилизируется температура холодной стенки образцов. Это указывает на существование стационарного режима теплопередачи в ТИМ. При этом время задержки увеличивается с ростом толщины образца, т.е. время выхода температуры холодной стенки на стационарный режим зависит от толщины образца.

Сравнение рис. 3 показывает, что эффективность теплоизолирующих конструкций увеличивается с ростом толщины стенки и при уменьшении плотности ТИМ.

Помимо экспериментального исследования изменения температур стенок образцов во времени в представленной статье изучена усадка ТИМ в процессе нагревания конструкции, поскольку это явление может существенно снизить эффективность теплоизолирующих конструкций. Результаты испытаний представлены на рис. 4 для ТИМ на основе базальтового (Б), кварцевого (Кв) и каолинового (К) волокон. Их анализ показал, что для каждого материала можно определить допустимые температуры нагревания горячей стенки образцов, превышение



**Рис. 4. Изменение усадки волоконистых материалов в зависимости от температуры:**

Б — базальтовое волокно; КВ — кварцевое волокно; К — каолиновое волокно; 1 — усадка по длине; 2 — усадка по толщине

которых сопровождается интенсивной усадкой. Для ТИМ на основе базальтового, кварцевого и каолинового волокон допустимые температуры соответственно равны 900, 1100 и 1350 °С.

Уравнение теплопроводности

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \Delta T, \quad (1)$$

которое традиционно используется при анализе процессов теплопередачи, удовлетворительно описывает нестационарные процессы теплообмена в слоях материала небольшой толщины и малой пористости.

Здесь  $T$  — температура, которая в силу линейности и однородности уравнения может измеряться с помощью шкал Кельвина и Цельсия;

$a = \frac{\lambda}{\rho C_v}$  — коэффициент температуропроводности;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности,  $\rho$ ,  $C_v$  — плотность и теплоемкость материала;

$\Delta = \sum \frac{\partial^2}{\partial x_i^2}$  — оператор Лапласа;  $t$  — время,  $x_i$  — пространственная координата.

Однако при описании стационарных режимов теплопередачи в пористых ТИМ получаются тривиальные и независящие от физических свойств материала решения. Так, в плоском случае температурное поле не зависит от координаты ( $T_m = \text{const}$ ) и соответствует температуре горячей стенки, а в сферическом случае температура в теплоизоляционных материалах уменьшается обратно пропорционально расстоянию

$$T = T_r \frac{r_0}{r},$$

где  $T_r$ ,  $r_0$  — температура и координата горячей стенки теплоизоляционного материала;  $r$  — расстояние точки теплоизоляционного материала от оси симметрии.

В качестве основы для описания стационарного режима теплопередачи в высокопористых ТИМ можно положить учет теплового излучения Стефана–Больцмана в поровое пространство.

Для плоского случая примем, что теплота, поступившая в слой толщиной  $dx$ , расходуется не только на нагрев материала до температуры  $T$ , но и на излучение энергии в поровое пространство. Мощность излучения в соответствии с законом Стефана–Больцмана равна

$$R = \sigma T^4,$$

где  $\sigma$  — константа Стефана–Больцмана.

В соответствии с законом теплопередачи Фурье на границах слоя толщиной  $dx$  через поверхности площадью  $S$  передаются тепловые потоки, разность которых

$$\Delta q = -\lambda S \left[ \frac{\partial T}{\partial x} - \left( \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx \right) \right] dt$$

определяет поступающую в слой теплоту за время  $dt$

$$\Delta Q = \lambda S \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx dt,$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности наполнителя теплоизоляционного материала (базальта, кварца, каолина, стекла),  $t$  — время.

Часть поступившей в слой теплоты расходуется на излучение энергии в поры. Поэтому эффективная теплота на нагрев наполнителя будет равна

$$\Delta Q^* = \left( \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \sigma S_{\text{пор}}^0 T^4 \right) S dx dt,$$

где  $S_{\text{пор}}^0$  — удельная площадь поверхности пор в единице объема материала.

В свою очередь изменение внутренней энергии будет равно

$$\Delta Q^* = S \rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} dx dt,$$

где  $\rho = \rho_i v$  — плотность теплоизоляционного материала,  $\rho_i, v, C_v$  — плотность, объемная доля и теплоемкость наполнителя.

Отсюда уравнение теплопроводности можно записать в виде

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - a_1 T^4,$$

где  $a_1 = \chi a_2$ ,  $a_2 = \frac{\sigma S_{\text{пор}}^0}{\lambda}$ ,  $\chi$  — эмпирическая поправка, учитывающая многократное взаимодействие потока теплового излучения между смежными волокнами наполнителя, а также хаотичность простран-

ственной ориентации волокон и несовершенство контактов между волокнами.

Полученное уравнение выгодно отличается от уравнения (1), так как в стационарном случае принимает вид

$$\frac{d^2T}{dx^2} - a_1T^4 = 0. \quad (2)$$

Введем следующие обозначения:

$$p = \frac{dT}{dx}, \quad \frac{d^2T}{dx^2} = p \frac{dp}{dT},$$

формулу (2) представим как уравнение

$$\frac{dp^2}{dT} = 2a_1T^4,$$

решение которого имеет вид

$$p = (C_1 + a_1T^5)^{\frac{1}{2}},$$

где  $C_1$  — константа интегрирования.

Дальнейшее интегрирование полученного выражения дает общее решение

$$x = - \int_{T_r}^T \frac{dT}{\sqrt{a_1T^5 + C_1}},$$

где  $T_r, x$  — соответственно температура и расстояние от горячей стенки.

Для случая  $C_1 = -a_1T_H^5$  решение принимает вид

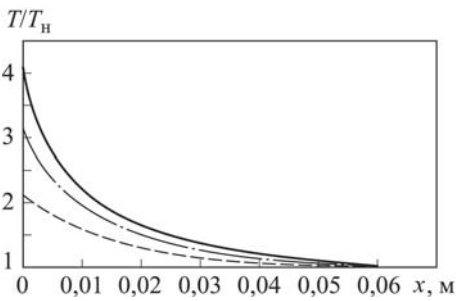
$$x = \frac{\int_{\bar{T}}^{\bar{T}_r} \frac{dT}{\sqrt{\bar{T}^5 - 1}}}{T_H^{3/2} \sqrt{a_1}}, \quad (3)$$

где  $\bar{T} = \frac{T}{T_H}$ . Обработка представленных на рис. 3 экспериментальных данных позволила установить значение параметра  $a_1 = 5,8 \times 10^{-6}$ , которое обеспечивает их аппроксимацию со средней погрешностью 3 %.

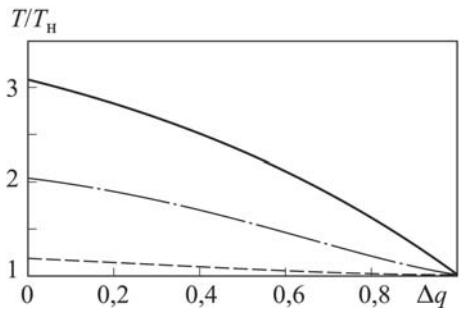
Взаимосвязь относительного значения  $\bar{T}$ , координаты  $x$  и температуры горячей стенки представлена на рис. 5.

Соотношение (3) показывает, что если ТИМ рассматривать как сплошную среду, то особенностью этой среды является функциональная зависимость теплопроводности от температуры горячей стенки.

Полученное решение позволяет предложить соотношение для проектного расчета толщины  $\delta$  стенки теплоизолирующей конструкции по



**Рис. 5. Зависимость градиента температуры от координаты поверхности трубы:**  
 --- — 350 °С; -.- - 650 °С, — — 930 °С — температура горячей стенки



**Рис. 6. Зависимость температуры от тепловых потерь:**  
 --- — 350 °С; -.- - 650 °С, — — 900 °С — температура горячей стенки

требуемому перепаду температур  $T_r$  и  $T_x$  горячей и холодной стенок:

$$\delta = \frac{\int_{\bar{T}_x}^{\bar{T}_r} \frac{dT}{\sqrt{\bar{T}^5 - 1}}}{T_H^{3/2} \sqrt{a_1}}. \quad (4)$$

Поток теплоты в произвольном слое ТИМ можно оценить при помощи полученного решения (3) по формуле

$$q = -\lambda_0 \frac{dT}{dx} = \lambda_0 \sqrt{a_1} T_H^{3/2} \sqrt{\bar{T}^5 - 1},$$

где  $\lambda_0$  — коэффициент теплопроводности композиционной структуры высокопористого ТИМ.

Тепловые потери можно представить в следующем виде:

$$\Delta q = 1 - \frac{\sqrt{T^5 - T_H^5}}{\sqrt{T_r^5 - T_H^5}}.$$

Откуда можно выразить зависимость температуры от тепловых потерь

$$\bar{T} = \left[ 1 + (1 - \Delta q)^2 (\bar{T}_r^5 - 1) \right]^{\frac{1}{5}},$$

которая представлена на рис. 6.

**Выводы.** 1. Проведенные исследования с образцами ТИМ показали существование стационарного режима изменения температуры по слоям образца.

2. Получено уравнение теплопроводности, описывающее стационарный режим изменения температуры в ТИМ. Уравнение показывает, что излучение Стефана–Больцмана делает нелинейной связь температур горячей и холодной стенок образца.



3. Установлен уровень тепловых потерь на излучение Стефана–Больцмана.

4. Предложенное решение позволяет вести расчет толщины теплоизолирующего слоя с одновременной оптимизацией пористости материала. Полученные результаты создают основу для выбора технологического решения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Основы технологии производства летательных аппаратов (в конспектах лекций): учеб. пособие / А.С. Чумадин, В.И. Ершов, В.А. Барвинок, В.И. Богданович. М.: Наука и технологии, 2005. 850 с.*
2. *Режимы фильтрационного осаждения элементов теплозащиты РКТ / В.А. Тарасов, Ю.В. Смирнов, М.П. Тимофеев, А.С. Филимонов // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2007. № 5. С. 52–55.*
3. *Тимофеев М.П. Разработка и исследование фильтрационной технологии изготовления изделий машиностроения из волокнистых неорганических материалов: дисс... кандидата технических наук: 05.02.08; МГТУ им. Н.Э. Баумана. М., 2007.*

## REFERENCES

- [1] Chumadin A.S., Ershov V.I., Barvinok V.A., Bogdanovich V.I. *Osnovy tekhnologii proizvodstva letatel'nykh apparatov* [Basic principles of aircraft production technology]. Moscow, Nauka i Tekhnologii Publ., 2005. 850 p.
- [2] Tarasov V.A., Smirnov Yu.V., Timofeev M.P., Filimonov A.S. Modes of filtrational sedimentation of heat-insulation elements in rocket and space technology. *Polet. Obshcherossiyskiy Nauchno-Tekhn. Zh.* [Flight. All-Russ. Sci. Tech. J.], 2007, no. 5, pp. 52–55 (in Russ.).
- [3] Timofeev M.P. *Razrabotka i issledovanie fil'tratsionnoy tekhnologii izgotovleniya izdeliy mashinostroeniya iz voloknistykh neorganicheskikh materialov* [Development and study of filtration technology for manufacturing products from fibrous inorganic materials. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 2007.

Статья поступила в редакцию 16.06.2013

Владимир Алексеевич Тарасов — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой “Технологии ракетно-космического машиностроения”. Автор более 200 научных работ в области технологии машиностроения, контроля и диагностики. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

V.A. Tarasov — Dr. Sci. (Eng.), professor, head of “Technologies of Rocket and Space Engineering” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of technology of mechanical engineering, control and diagnostics. Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Михаил Петрович Тимофеев — канд. техн. наук, доцент кафедры “Технологии машиностроения” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 15 научных работ в области технологии машиностроения. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

M.P. Timofeev — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of “Technologies of Rocket and Space Engineering” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 15 publications in the field of technology of mechanical engineering.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Юлия Владимировна Ермакова — студентка кафедры “Технологии ракетно-космического машиностроения” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор четырех научных работ в области космического машиностроения.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Yu.V. Yermakova — student of “Technologies of Rocket and Space Engineering” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 4 publications in the field of technology of space machinery.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Раиса Владимировна Боярская — канд. техн. наук, доцент кафедры “Технологии машиностроения” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 55 научных работ в области технологии машиностроения, контроля и диагностики.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

R.V. Boyarskaya — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of “Technologies of Rocket and Space Engineering” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 55 publications in the field of technology of mechanical engineering, control and diagnostics.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russian Federation.