

# Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 662.998.3:666.189

doi: 10.18698/0536-1044-2020-7-59-68

## Оценка эксплуатационных характеристик коротковолокнистой базальтовой теплоизоляции при криогенных температурах

М.А. Комков<sup>1</sup>, М.П. Тимофеев<sup>1</sup>, А.В. Ларионова<sup>2</sup><sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана<sup>2</sup> Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН

## An Evaluation of Performance Characteristics of Short-Fiber Basalt Insulation at Cryogenic Temperatures

M.A. Komkov<sup>1</sup>, M.P. Timofeev<sup>1</sup>, A.V. Larionova<sup>2</sup><sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University<sup>2</sup> Baikov Institute of metallurgy and materials science of the Russian Academy of Sciences

Показана перспективность применения высокопористой теплоизоляции криогенных трубопроводов из коротких базальтовых супертонких волокон, измельченных по жидкостной технологии. На основе учета радиационного переноса тепла определены эффективный коэффициент теплопроводности, предельно допустимые пористость и плотность теплоизоляции из коротких базальтовых волокон со средним диаметром 1,88 мкм и длиной 1,0...1,5 мм. Приведены результаты испытаний на сжатие высокопористых плоских образцов теплоизоляции из коротких базальтовых волокон со связующим из  $Al_2O_3$  и без него. Установлено, что у теплоизоляционного материала со связкой прочность, модуль упругости и упругие деформации при сжатии в 2 раза лучше, чем у образцов без минеральной связки.

**Ключевые слова:** криогенная температура, высокопористая теплоизоляция, короткие базальтовые волокна, фильтрационное осаждение, прочность на сжатие

This work shows the potential of highly porous thermal insulation made of short basalt super-thin fibers chopped using liquid technology for insulating cryogenic piping. The effective heat conductivity coefficient, maximum-permissible porosity and insulation density were determined for short basalt fibers with a mean diameter of 1.88 μm and a length of 1.0–1.5 mm, taking into account radiation heat transfer. The results of compression tests are presented for highly porous flat insulation samples made of short basalt fibers without binding agents and those reinforced with  $Al_2O_3$ . It is established that the thermal insulation material containing a binding agent has the strength, elasticity modulus and elastic compression deformation two times higher than samples without a mineral binding agent.

**Keywords:** cryogenic temperature, high-porosity thermal insulation, short basalt fibers, filtrational settling, compression strength

Перспективным топливом разгонных блоков и воздушно-космических самолетов следующего поколения [1–3] являются криогенные топлива: жидкий водород, метан и кислород [4]. Первые опытные полеты самолетов на жидком водороде (ТУ-155 [5]), жидком метане и забортом кислороде (ТУ-156) были выполнены в СССР в 1986–1989 гг. прошлого века. Подача криогенного горючего проводилась по топливопроводам типа «термокейс» диаметром 50...150 мм [6, 7], в которых межтрубное вакуумированное пространство заполнялось экранно-вакуумной теплоизоляцией.

С одной стороны, приведенная масса таких трубопроводов при наличии на борту самолета систем вакуумирования и контроля чрезвычайно велика (5...9 кг/м) [1, 7]. С другой стороны, если в качестве теплоизоляции использован пенополиуретан типа Викорт-3М плотностью 250 кг/м<sup>3</sup> с внешней защитно-герметичной оболочкой из полимерной пленки, то в нем после многоциклового захлаживания и отогрева образуются трещины [8], что резко повышает теплопроводность материала изделия.

Анализ работ, выполненных М.А. Комковым, М.П. Тимофеевым, В.А. Тарасовым, Ю.В. Баданиной [9–12] и другими авторами, по применению коротких базальтовых супертонких волокон (БСТВ), измельченных и очищенных от неволоконистых включений с помощью жидкостной технологии [13], показывает, что они могут быть использованы в качестве теплоизоляционных покрытий в криогенных трубопроводах [14–17], насосно-компрессорных трубах [10–12] и других изделиях, работающих в диапазоне температур –260...700 °С.

Однако предельно допустимые значения плотности и пористости теплоизоляционных материалов (ТИМ) из коротких базальтовых волокон исследованы недостаточно полно.

Цель работы — определение максимальной пористости коротковолокнистой базальтовой теплоизоляции при учете лучистого переноса тепла, обеспечивающей ей минимальную массу и допустимую прочность на сжатие.

**Постановка задачи и проведение экспериментов.** Снизить теплопроводность, а следовательно, и массу теплоизоляции криогенного трубопровода из коротких БСТВ в виде цилиндрических скорлуп [9] можно путем увеличения пористости волокнистого материала

$m = V_{\text{пор}}/V_{\text{ТИМ}}$ , где  $V_{\text{пор}}$  — объем пор;  $V_{\text{ТИМ}}$  — объем ТИМ.

Однако в случае высокой пористости становится заметным лучистый перенос тепла, который зависит от диаметра волокон и будет резко возрастать при  $m \rightarrow 1$ . Эффективная теплопроводность волокнистой теплоизоляции в межтрубном пространстве будет определяться выражением

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_{\text{конд}} + \lambda_{\text{рад}} = \lambda_{\text{б.в}} + \lambda_{\text{возд}} + \lambda_{\text{рад}}, \quad (1)$$

где  $\lambda_{\text{конд}}$  и  $\lambda_{\text{рад}}$  — коэффициенты кондуктивной и радиационной теплопроводности;  $\lambda_{\text{б.в}}$  и  $\lambda_{\text{возд}}$  — коэффициенты теплопроводности материала БСТВ и сухого воздуха.

Анализ экспериментальных данных, полученных для коэффициентов теплопроводности материала БСТВ диаметром 1,5...3,0 мкм [18], показывает, что они могут быть усреднены и аппроксимированы линейной зависимостью (рис. 1)

$$\lambda_{\text{б.в}}(T) = \lambda_{06} [1 + a(T - T_0)], \quad (2)$$

где  $T$  — текущая температура;  $\lambda_{06}$  — коэффициент теплопроводности материала БСТВ при температуре  $T_0 = 20$  °С,  $\lambda_{06} = 0,032$  Вт/(м·К);  $a$  — коэффициент аппроксимации,  $a = 1/170$  К<sup>-1</sup>.

Для спокойного воздуха экспериментальные значения коэффициента теплопроводности

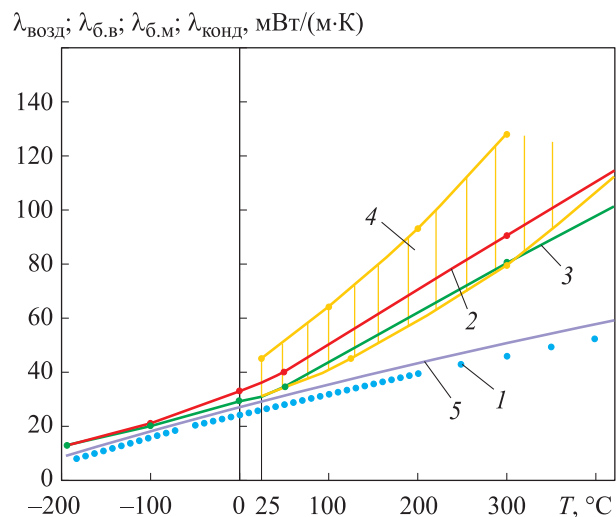


Рис. 1. Зависимость коэффициентов теплопроводности сухого воздуха  $\lambda_{\text{возд}}$  (1), материала БСТВ  $\lambda_{\text{б.в}}$  диаметром 3 (2) и 1,5 мкм (3), базальтового прошивного мата  $\lambda_{\text{б.м}}$  из штапельных волокон плотностью 95...125 кг/м<sup>3</sup> (4) и расчетного коэффициента кондуктивной теплопроводности  $\lambda_{\text{конд}}$  (5) от температуры  $T$  для базальтовой коротковолокнистой теплоизоляции пористостью  $m = 0,94$

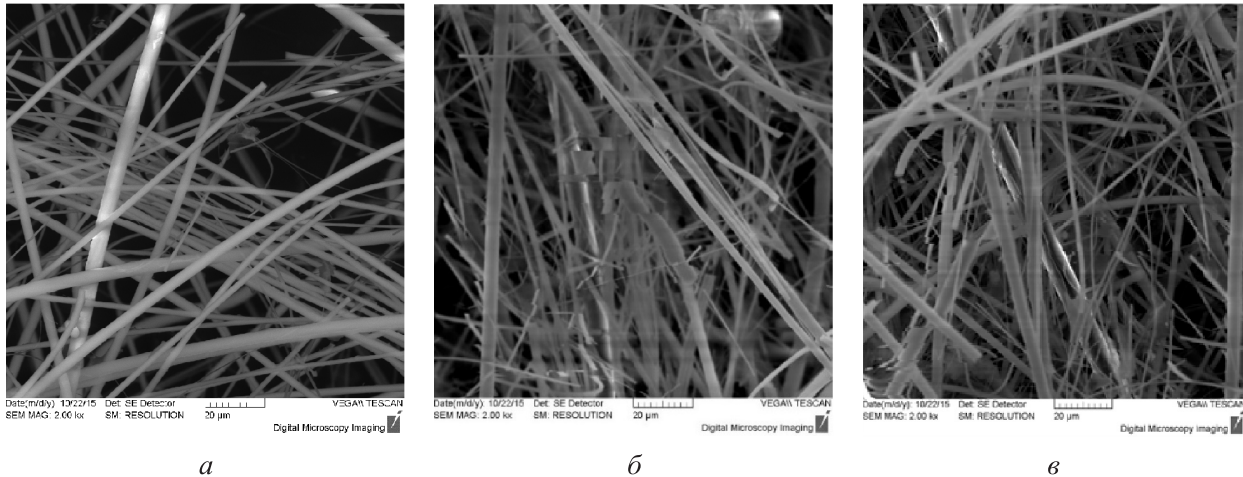


Рис. 2. Электронные снимки в трех (а–в) разных областях одного плоского образца теплоизоляции из БСТВ со связкой из  $Al_2O_3$ , использованные для анализа диапазона их диаметров

сухого воздуха (см. рис. 1) также можно выразить линейной зависимостью

$$\lambda_{\text{возд}}(T) = \lambda_{0\text{в}} [1 + b(T - T_0)], \quad (3)$$

где  $\lambda_{0\text{в}}$  — коэффициент теплопроводности воздуха при температуре  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $\lambda_{0\text{в}} = 0,0257 \text{ Вт/(м·К)}$ ;  $b = 1/380 \text{ К}^{-1}$ .

Средние значения коэффициентов теплопроводности сухого воздуха  $\lambda_{\text{возд}}^{\text{ср}} = 0,02063 \text{ Вт/(м·К)}$  и материала БСТВ  $\lambda_{\text{б.в}}^{\text{ср}} = 0,0301 \text{ Вт/(м·К)}$  в интервале температур  $T = -196 \dots 60^\circ\text{C}$  получены на основании графиков, приведенных на рис. 1 [9].

На этом рисунке показана зависимость коэффициентов теплопроводности сухого воздуха  $\lambda_{\text{возд}}$ , материала БСТВ  $\lambda_{\text{б.в}}$  диаметром 3 и 1,5 мкм [18], базальтового прошивного мата  $\lambda_{\text{б.м}}$  [19] из штапельных волокон плотностью  $95 \dots 125 \text{ кг/м}^3$  от температуры  $T$  для базальтовой коротковолокнистой теплоизоляции пористостью  $m = 0,94$ .

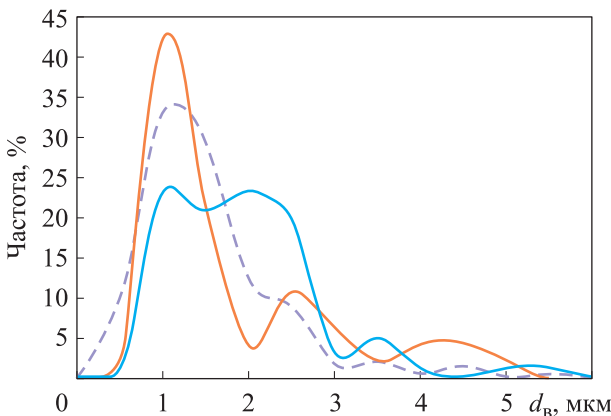


Рис. 3. Частотное распределение диаметров БСТВ, полученных с трех снимков, показанных на рис. 2, а (—), б (—) и в (---)

стостью  $m = 0,94$ . Точки являются экспериментальными данными, кривые 2 и 3 — результатом их аппроксимации. Заштрихованная между двумя кривыми зона 4 — область изменения коэффициентов теплопроводности прошивного мата  $\lambda_{\text{б.м}}$  из базальтовых волокон. Там же показана расчетная (полученная на основе правила суммирования) зависимость коэффициента кондуктивной теплопроводности  $\lambda_{\text{конд}}$  от температуры для базальтовой коротковолокнистой теплоизоляции пористостью  $m = 0,94$  (кривая 5).

Для исследования теплоизоляционных покрытий криогенных трубопроводов выбраны БСТВ фирмы MINOL [19, 20] с волокнами диаметром  $0,5 \dots 3,5 \text{ мкм}$  и длиной  $50 \dots 60 \text{ мм}$ . После жидкостной дезинтеграции (измельчения) волокон до длины  $1,0 \dots 1,5 \text{ мм}$ , очистки их от мусора (корольков, игл и т. п.) были изготовлены плоские образцы размером  $160 \times 160 \text{ мм}$  и сделаны электронные снимки материала в плоскости осаждения коротких волокон (рис. 2, а–в).

Диаметры волокон, показанных на рис. 2, а–в, измерены с помощью программы по обработке изображений. Установлено, что среднее значение диаметра волокон  $d_b = 1,88 \text{ мкм}$ . На рис. 3 приведено семейство частотных распределений, соответствующих обработанным изображениям.

**Обсуждение результатов.** Без учета тепловых потерь на радиационный перенос тепла и при спокойном состоянии воздуха в порах ТИМ коэффициент кондуктивной теплопроводности на основании правила смесей и выражений (1)–(3) можно представить в виде

$$\lambda(m, T) = \lambda_{\text{конд}} = m \lambda_{\text{возд}}^{\text{сп}} + (1-m) \lambda_{\text{б.в}}^{\text{сп}}, \quad (4)$$

где  $m = 1 - \rho_{\text{ТИМ}} / \rho_{\text{б.в}}$ ,  $\rho_{\text{ТИМ}}$  — плотность ТИМ;  $\rho_{\text{б.в}}$  — плотность материала БСТВ,  $\rho_{\text{б.в}} = 2750 \text{ кг/м}^3$ .

Для нахождения коэффициента радиационной теплопроводности воспользуемся следующими соотношениями [21]:

$$\lambda_{\text{рад}} = \frac{\sigma_0 T_m^3}{K_{\text{осл}}} \frac{\pi d_{\text{в}}}{(1-m)}; \quad (5)$$

$$K_{\text{осл}} = 70 m d_{\text{в}} T_m + 5 \cdot 10^3 (1-m) / T_m; \quad (6)$$

$$T_m = (T_1 + T_2) / 2, \quad (7)$$

где  $\sigma_0$  — постоянная Больцмана,  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ;  $T_m$  — средняя температура теплоизоляции,  $T_m = 176,5 \text{ К}$ ;  $K_{\text{осл}}$  — коэффициент ослабления (связанный с коэффициентом черноты и отражательной способностью БСТВ);  $T_1$  — температура теплоизоляционного покрытия топливопровода,  $T_1 = 333 \text{ К}$ ;  $T_2$  — температура жидкого водорода,  $T_2 = 20 \text{ К}$ .

По формулам (5)–(7) проведен расчет коэффициента радиационной теплопроводности волокнистой теплоизоляции  $\lambda_{\text{рад}}$  для максимального, среднего и минимального диаметров волокон (см. рис. 2 и 3). Графическая зависимость радиационной теплопроводности от пористости материала теплоизоляции  $m$  при диаметре волокна  $d_{\text{в}} = 5,50; 3,50; 1,88$  и  $0,50 \text{ мкм}$ , приведена на рис. 4.

Анализ графиков рис. 4 показывает, что при пористости, выше  $0,95$ – $0,96$  коэффициента ра-

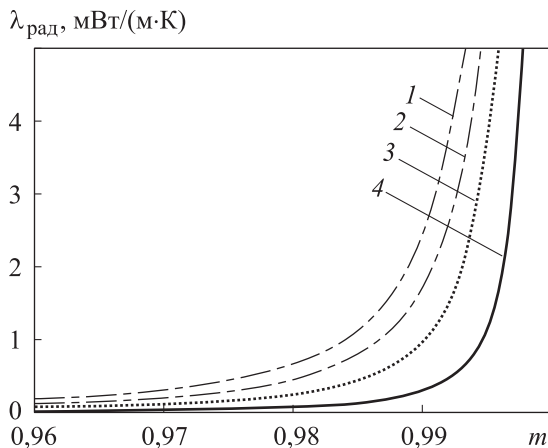


Рис. 4. Зависимость радиационной теплопроводности  $\lambda_{\text{рад}}$  от пористости  $m$  при диаметре волокна  $d_{\text{в}} = 5,50$  (1),  $3,50$  (2),  $1,88$  (3) и  $0,50 \text{ мкм}$  (4)

диационной теплопроводности, а следовательно, и лучистый перенос тепла резко возрастают, особенно для больших диаметров базальтовых волокон.

После определения коэффициентов кондуктивной и радиационной теплопроводности по формулам (4) и (5) и подстановки их в соотношение (1) с учетом данных, приведенных на рис. 1 и 4, получаем зависимость коэффициента эффективной теплопроводности базальтовой коротковолокнистой теплоизоляции от пористости материала в диапазоне температур  $T = -253 \dots 60 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 5, а, б).

Из рис. 5 следует, что оптимальным значением пористости можно считать  $m = 0,960 \dots 0,950$ , при котором разница между коэффициентами теплопроводности  $\lambda_{\text{эф}}$  и  $\lambda_{\text{конд}}$  находится в пределах  $0,2 \dots 0,3 \%$ . Следовательно, радиационная теплопроводность, определенная по формуле (5), оказывает существенное влияние на коэффициент  $\lambda_{\text{эф}}$  лишь при очень малой плотности материала теплоизоляции и высокой пористости  $m \geq 0,960$ .

При пористости волокнистой структуры  $m \leq 0,940$  радиационная теплопроводность намного меньше кондуктивной, поэтому в выражении (1) ее можно не учитывать.

Определим минимальное значение плотности ТИМ для коротковолокнистой базальтовой теплоизоляции пористостью  $m = 0,950 \dots 0,960$ . С учетом указанной пористости и плотности БСТВ  $\rho_{\text{б.в}} = 2750 \text{ кг/м}^3$  итоговая плотность базальтовой теплоизоляции

$$\rho_{\text{ТИМ}} = (1-m) \rho_{\text{б.в}} = 110 \dots 137,5 \text{ кг/м}^3.$$

На практике минимальное значение пористости обычно не превышает  $0,930 \dots 0,940$ . При этом плотность теплоизоляции будет составлять  $165,0 \dots 192,5 \text{ кг/м}^3$ .

Однако если пористость высока, то возникает проблема увеличения прочности материала теплоизоляции на сжатие при циклических нагрузках. Для повышения прочности и упругих деформаций на сжатие при воздействии вибрационных, акустических и ударных нагрузок в процессе транспортирования и полета изделия в ТИМ покрытий криогенных трубопроводов или других изделий вводят неорганическую связку из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в количестве  $5,5 \dots 6,5 \%$  по массе [9, 13].

Анализ современных недорогих неорганических связок, применяемых в производстве ТИМ, показал, что окись алюминия, получаемая из солей сернокислого алюминия, удовле-

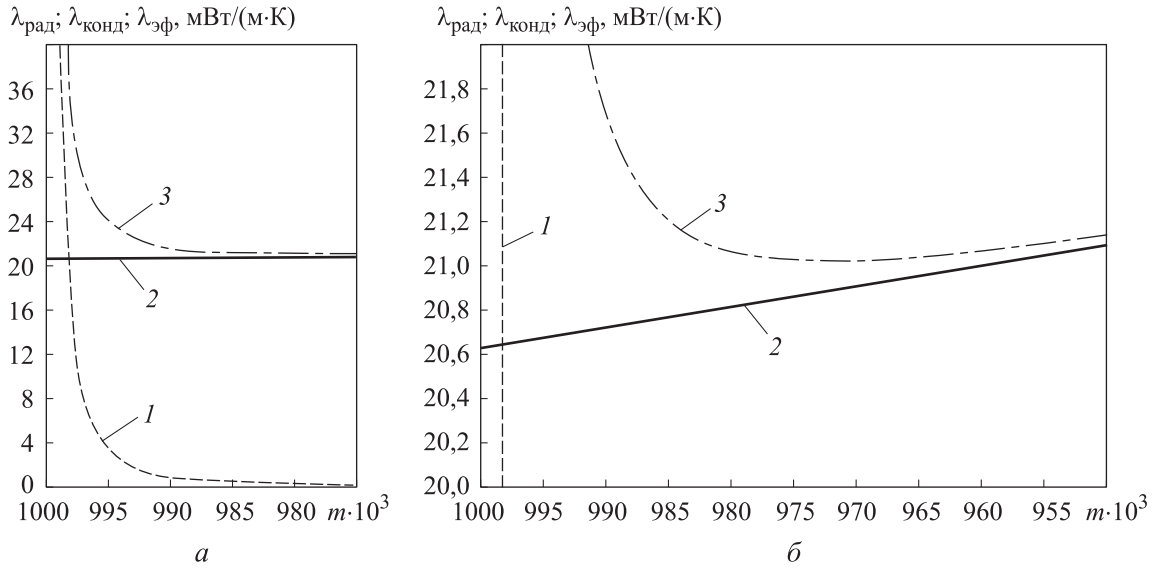


Рис. 5. Зависимость коэффициентов радиационной  $\lambda_{\text{рад}}$  (1), кондуктивной  $\lambda_{\text{конд}}$  (2) и эффективной  $\lambda_{\text{эф}}$  (3) теплопроводности от пористости материала  $m$  в диапазоне температур  $T = -253...60$  °С (а) и ее увеличенный фрагмент (б)

творяет работоспособности базальтовой теплоизоляции во всем интервале температур  $T = -253,15...700,00$  °С.

При изготовлении изделий из высокопористых волокнистых материалов методом фильтрационного осаждения связку вводят в виде

свежеосажденной гидроокиси алюминия, которая представляет собой объемистый студенистый осадок белого цвета, практически нерастворимый в воде и полностью осаждаемый на волокна при кислотности (водородном показателе) суспензии  $pH = 7,5...8,5$  [22–24].

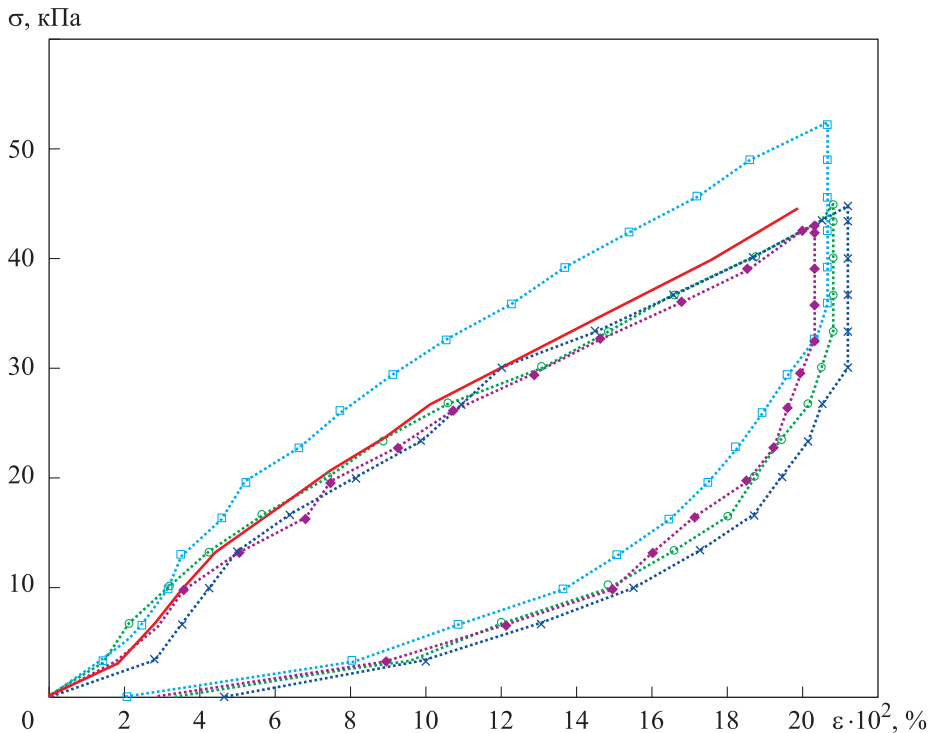


Рис. 6. Изменение напряжения сжатия образцов со связкой  $Al_2O_3$  и восстановление их толщины после снятия нагрузки:

№ 2-1; № 2-2; № 2-3; № 2-4

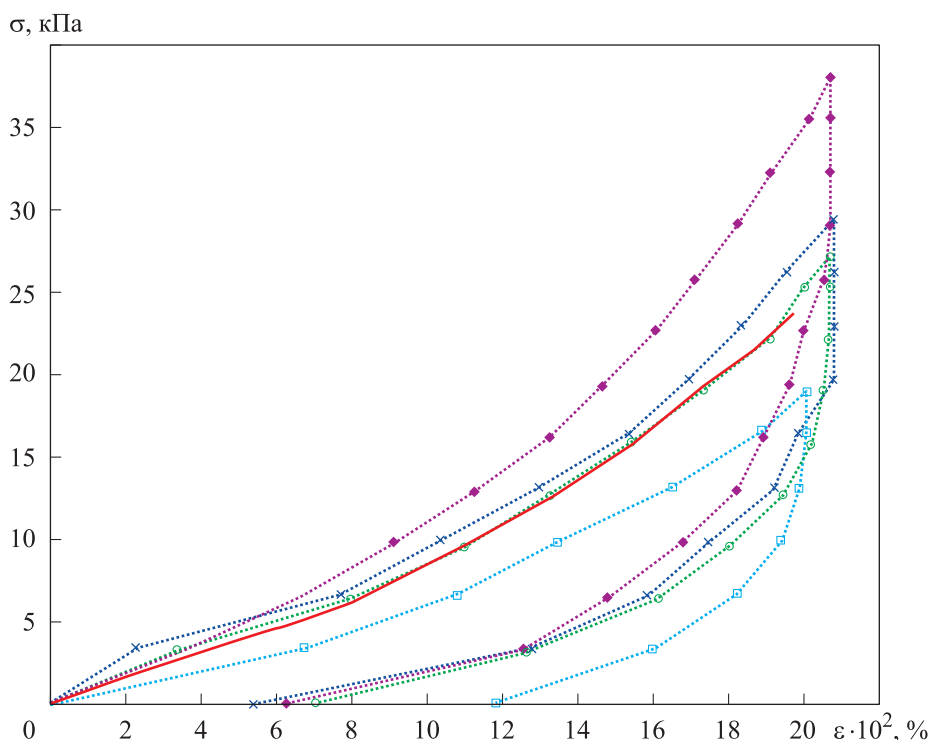


Рис. 7. Изменение напряжения сжатия образцов без связки и восстановление их толщины после снятия нагрузки:

—•••— № 5-1; —□□□— № 5-2; —○○— № 5-3; —◆◆— № 5-4

Для испытаний на сжатие высокопористого ТИМ изготовили плоские образцы размером 160×160 мм из коротких БСТВ со связкой  $Al_2O_3$  и без нее, которые разрезали на четыре равные части. Опыты проводили на испытательной машине FP 10/1 с использованием реверсивного устройства. На поверхности образцов, к которым прикладывалась нагрузка при сжатии, установили стеклянные пластинки, что позволило снизить трение волокнистого материала по торцам образцов.

На рис. 6 показаны зависимости напряжения сжатия  $\sigma$  от деформации  $\epsilon$  для каждого из четырех образцов № 2-1...2-4 толщиной 28 мм с исходной плотностью 146 кг/м<sup>3</sup> и содержанием связки из  $Al_2O_3$  5,5 %. Там же приведена осредненная по четырем образцам зависимость напряжения  $\sigma$  от деформации на участке активного нагружения (сплошная красная кривая). По осредненной диаграмме при деформации  $\epsilon = 20$  % напряжение сжатия составляет 0,044 МПа, а секущий модуль упругости материала — 0,220 МПа.

На рис. 7 показаны зависимости напряжения сжатия  $\sigma$  от деформации  $\epsilon$  для каждого из четырех образцов № 5-1...5-4 толщиной 56 мм с исходной плотностью 196 кг/м<sup>3</sup> из коротких

базальтовых волокон без связки. По осредненной диаграмме при деформации  $\epsilon = 20$  % (сплошная красная кривая) напряжение составляет 0,024 МПа, а секущий модуль упругости материала при деформации 12 % равен 0,0933 МПа. Таким образом, полученные значения прочности и модуля упругости теплоизоляционного материала без связки при сжатии образцов почти в 2 раза меньше, чем такие же показатели для образцов со связкой из  $Al_2O_3$ . Кроме того, для образцов без связки, после снятия сжимающей нагрузки, толщина образцов не восстанавливается, а остаточная деформация составляет 6...8 %.

## Выводы

1. Изучены цифровые фотографии ТИМ из БСТВ. Получено распределение волокон по диаметрам, определен средний, максимальный и минимальный диаметры волокон.

2. Рассчитаны коэффициенты радиационной теплопроводности теплоизоляции при различной пористости для разных диаметров волокон: указанного производителем (0,5...3,5 мкм), среднего (1,88 мкм) и максимального (3,5 мкм). Показано, что при повышении пористости и

увеличении диаметра волокон более предельных значений этот коэффициент резко возрастает.

3. Установлено, что максимально допустимое значение пористости для исследуемого ТИМ из БСТВ находится в интервале 0,95...0,96. При этом плотность материала теплоизоляции лежит в пределах 110,0...137,5 кг/м<sup>3</sup>.

4. Определено, что при сжатии плоские образцы высокопористой теплоизоляции из коротких БСТВ со связкой из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> упруго деформируются вплоть до 20 % и практически полностью восстанавливаются после снятия сжимающей нагрузки.

## Литература

- [1] Андреев В.А., Борисов В.Д., Климов В.Т. *Внимание: газы. Криогенное топливо для авиации: Справочник-воспоминание для всех*. Москва, Московский рабочий, 2001. 223 с.
- [2] Мохов В. Первый разгонный блок 12КРБ отправлен в Индию. *Новости космонавтики*, 1998, № 21/22, с. 42–43.
- [3] Журавин Ю. «Море» планов «Ангары». *Новости космонавтики*, 1999, № 3(194), с. 48–49.
- [4] Патрунов Ф.Г. *Ниже 120 градусов по Кельвину*. Москва, Знание, 1989. 176 с.
- [5] Федоров Г., Максимович Г. Самолет завтрашнего дня — Ту-155 на водородном топливе: АНТК им. А.Н. Туполева. *Крылья Родины*, 1989, № 6.
- [6] Архаров А.М., Кунис И.Д. *Криогенные заправочные системы стартовых ракетно-космических комплексов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 252 с.
- [7] Кряковкин В.П., Клеблеев Т.И., Ленский А.Б. Криогенные трубопроводы: от разработки до ввода в эксплуатацию. *Технические газы*, 2014, № 4, с. 67–71.
- [8] Комков М.А., Баданина Ю.В., Потапов Д.А., Новикова А.С. Криогенный трубопровод с коротковолокнистой базальтовой теплоизоляцией. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 11. URL: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-11-1825>, doi: 10.18698/2308-6033-2018-11-1825
- [9] Баданина Ю.В. *Технологическое проектирование высокопористых теплоизолирующих конструкций из коротких базальтовых волокон на основе метода жидкостной фильтрации*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 16 с.
- [10] Баданина Ю.В., Комков М.А., Тарасов В.А., Тимофеев М.П., Моисеев А.В. Моделирование и экспериментальное определение технологических параметров жидкостного формования базальтовой теплоизоляции насосно-компрессорных труб. *Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2015, № 04, с. 13–28, doi: 10.7463/0315.0761820
- [11] Комков М.А., Моисеев В.А., Тарасов В.А., Тимофеев М.П. Уменьшение негативного влияния на биосферу при добыче тяжелой нефти и экологически чистая технология закачки пара сверхкритических параметров в нефтяные пласты за счет создания новых насосно-компрессорных труб с экологически чистым теплозащитным покрытием. *Геофизические процессы и биосфера*, 2015, т. 14, № 1, с. 70–79.
- [12] Комков М.А., Баданина Ю.В., Тарасов В.А., Филимонов А.С. Анализ структурных и теплофизических характеристик высокопористой базальтовой теплоизоляции насосно-компрессорных труб. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, № 1(61). URL: <http://engjournal.ru/eng/catalog/msm/smme/1575.html>, doi: 10.18698/2308-6033-2017-1-1575
- [13] Тимофеев М.П. *Разработка и исследование фильтрационной технологии изготовления изделий из волоконистых неорганических материалов*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 16 с.
- [14] Комков М.А., Потапов Д.А., Кудрявцев А.А. Оптимизация угла намотки на металлический лейнер криогенного трубопровода. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 9. URL: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-9-1673>, doi: 10.18698/2308-6033-2017-9-1673
- [15] Буланов И.М., Комков М.А. Применение жестких полимерных пленок в криогенных топливных системах аэрокосмической техники. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 1992, № 1, с. 14–24.
- [16] Сабельников В.В., Комков М.А., Саморядов А.В. Технология склеивания элементов криогенного трубопровода. *Клеи. Герметики. Технологии*, 2005, № 1, с. 16–20.

- [17] Комков М.А., Сабельников В.В., Баслык К.П. Конструктивно-технологический анализ трубопроводов, изготовленных из полиимидной пленки методом намотки. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2012, спец. вып. № 3, с. 78–86.
- [18] Джигирис Д.Д., Махова М.Ф. *Основы производства базальтовых волокон и изделий*. Москва, Теплоэнергетик, 2002. 411 с.
- [19] *Маты прошивные из базальтового супертонкого волокна (МПБСТВ) по ТУ 5762-002-47897055-2003*. URL: <https://bztm.su/catalog/teploizolyatsiya/maty-proshivnye/> (дата обращения 15 сентября 2019).
- [20] *Базальтовое супертонкое волокно «MINOL»*. Завод БСТВ «MINOL». URL: <http://uteplitel-minol.ru/products> (дата обращения 05 сентября 2019).
- [21] *Методика оценки влияния влажности на эффективность теплоизоляции оборудования и трубопроводов. МДС 41-7.2004*. URL: <http://www.gosthelp.ru/text/MDS4172004Metodikaocenkiiv.html> (дата обращения 25 сентября 2019).
- [22] Тарасов В.А., Смирнов Ю.В., Тимофеев М.П., Филимонов А.С. Режимы фильтрационного осаждения элементов теплозащиты РКТ. *Полет. Общероссийский научно-технический журнал*, 2007, № 5, с. 52–55.
- [23] Баданина Ю.В., Комков М.А., Тарасов В.А., Тимофеев М.П. Исследование влияния кислотности на процесс фильтрации и осаждения гидроокиси алюминия на коротковолокнистую базальтовую теплоизоляцию. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2018, № 8, с. 23–28, doi: 10.31044/1994-6260-2018-0-8-23-28
- [24] Badanina Yu.V., Komkov M.A., Tarasov V.A., Timofeev M.P. Analysis of the Effect of Hydromass Acidity on the Process of Filtration and Precipitation of Aluminum Oxide in Short-Fiber Basalt Heat Insulation. *Polymer Science – Series D*, 2019, vol. 12, iss. 1, pp. 72–76, doi: 10.1134/S1995421219010027

## References

- [1] Andreyev V.A., Borisov V.D., Klimov V.T. *Vnimanije: gazy. Kriogennoye toplivo dlya aviatsii: Spravochnik-vospominaniye dlya vseh* [Caution: gases. Cryogenic Fuel for Aviation: A Handbook for All]. Moscow, Moskovskiy rabochiy publ., 2001. 223 p.
- [2] Mokhov V. The first 12KRB overclocking unit sent to India. *Novosti kosmonavтики*, 1998, no. 21/22, pp. 42–43 (in Russ.).
- [3] Zhuravin Yu. The Sea of Angara Plans. *Novosti kosmonavтики*, 1999, no. 3(194), pp. 48–49 (in Russ.).
- [4] Patrunov F.G. *Nizhe 120 gradusov po Kel'vinu* [Below 120 degrees Kelvin]. Moscow, Znaniye publ., 1989. 176 p.
- [5] Fedorov G., Maksimovich G. The plane of tomorrow — Tu-155 on hydrogen fuel: ANTK named after A.N. Tupolev. *Kryl'ya Rodiny*, 1989, no. 6.
- [6] Arkharov A.M., Kunis I.D. *Kriogennyye zapravochnyye sistemy startovykh raketno-kosmicheskikh kompleksov* [Cryogenic refueling systems of launch rocket and space complexes]. Moscow, Bauman Press, 2006. 252 p.
- [7] Kryakovkin V.P., Klebleyev T.I., Lenskiy A.B. Cryogenic pipelines: from designing to putting into operation. *Tekhnicheskkiye gazy*, 2014, no. 4, pp. 67–71 (in Russ.).
- [8] Komkov M.A., Badanina Yu.V., Potapov D.A., Novikova A.S. Cryogenic pipeline with short fiber basalt insulation. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, iss. 11 (in Russ.). Available at: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-11-1825>, doi: 10.18698/2308-6033-2018-11-1825
- [9] Badanina Yu.V. *Tekhnologicheskoye proyektirovaniye vysokoporistykh teploizoliruyushchikh konstruksiy iz korotkikh bazal'tovykh volokon na osnove metoda zhidkostnoy fil'tratsii*. Kand. Diss. [Technological design of highly porous insulating structures made of short basalt fibers based on the liquid filtration method. Cand. Diss.]. Moscow, Bauman Press, 2017. 16 p.
- [10] Badanina Yu.V., Komkov M.A., Tarasov V.A., Timofeyev M.P., Moiseyev A.V. Simulation and Experimental Determination of Technological Liquid Molding Parameters of Tubing Basalt Insulation. *Science and Education of BMSTU*, 2015, no. 04, pp. 13–28 (in Russ.), doi: 10.7463/0315.0761820



- [11] Komkov M.A., Moiseyev V.A., Tarasov V.A., Timofeyev M.P. Minimization of negative influence on the biosphere in heavy oil extraction and ecologically clean technology for injection of steam with supercritical parameters on the basis of new ecologically clean tubing pipes with heat-resistant coatings. *Geofizicheskiye protsessy i biosfera*, 2015, vol. 14, no. 1, pp. 70–79 (in Russ.).
- [12] Komkov M.A., Badanina Yu.V., Tarasov V.A., Filimonov A.S. Analysis of structural and thermal-physical characteristics of high-porosity basalt thermal insulation for tubing. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, no. 1(61) (in Russ.). Available at: <http://engjournal.ru/eng/catalog/msm/smme/1575.html>, doi: 10.18698/2308-6033-2017-1-1575
- [13] Timofeyev M.P. *Razrabotka i issledovaniye fil'tratsionnoy tekhnologii izgotovleniya izdeliy iz voloknistykh neorganicheskikh materialov*. Kand. Diss. [Development and research of filtration technology for manufacturing products from fibrous inorganic materials. Cand. Diss.]. Moscow, Bauman Press, 2007. 16 p.
- [14] Komkov M.A., Potapov D.A., Kudryavtsev A.A. Optimizing the angle of winding carbon fiber reinforced plastic on the metal liner of the cryogenic pipeline. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, iss. 9 (in Russ.). Available at: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-9-1673>, doi: 10.18698/2308-6033-2017-9-1673
- [15] Bulanov I.M., Komkov M.A. The use of hard polymer films in cryogenic fuel systems of aerospace engineering. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 1992, no. 1, pp. 14–24 (in Russ.).
- [16] Sabel'nikov V.V., Komkov M.A., Samoryadov A.V. Bonding technology for cryogenic pipeline elements. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2005, no. 1, pp. 16–20 (in Russ.).
- [17] Komkov M.A., Sabel'nikov V.V., Baslyk K.P. Structural and technological analysis of pipelines made of polyimide film by winding. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2012, spec. iss. 3, pp. 78–86 (in Russ.).
- [18] Dzhigiris D.D., Makhova M.F. *Osnovy proizvodstva bazal'tovykh volokon i izdeliy* [Basics of the production of basalt fibers and products]. Moscow, Teploenergetik publ., 2002. 411 p.
- [19] *Maty proshivnyye iz bazal'tovogo supertonkogo volokna (MPBSTV) po TU 5762-002-47897055-2003* [Stitched mats from basalt superthin fiber (MPBST) according to TU 5762-002-47897055-2003]. Available at: <https://bztm.su/catalog/teploizolyatsiya/maty-proshivnyye/> (accessed 15 September 2019).
- [20] *Bazal'tovoye supertonkoye volokno "MINOL". Zavod BSTV "MINOL"* [Basalt superthin fiber "MINOL". Factory BSTV "MINOL"]. Available at: <http://www.bztm.su/bstv.php> (accessed 05 September 2019).
- [21] *Metodika otsenki vliyaniya vlazhnosti na effektivnost' teploizolyatsii oborudovaniya i truboprovodov. MDS 41-7.2004* [Methodology for assessing the effect of humidity on the efficiency of thermal insulation of equipment and pipelines. MDS 41-7.2004]. Available at: <http://www.gosthelp.ru/text/MDS4172004Metodikaoceniv.html> (accessed 25 September 2019).
- [22] Tarasov V.A., Smirnov Yu.V., Timofeyev M.P., Filimonov A.S. Modes of filtration deposition of thermal protection elements of the RCT. *All-Russian Scientific-Technical Journal Flight*, 2007, no. 5, pp. 52–55 (in Russ.).
- [23] Badanina Yu.V., Komkov M.A., Tarasov V.A., Timofeyev M.P. Study of the effect of acidity on the process of filtration and deposition of aluminum hydroxide on short-fiber basalt insulation. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2018, no. 8, pp. 23–28 (in Russ.), doi: 10.31044/1994-6260-2018-0-8-23-28
- [24] Badanina Yu.V., Komkov M.A., Tarasov V.A., Timofeev M.P. Analysis of the Effect of Hydromass Acidity on the Process of Filtration and Precipitation of Aluminum Oxide in Short-Fiber Basalt Heat Insulation. *Polymer Science – Series D*, 2019, vol. 12, iss. 1, pp. 72–76, doi: 10.1134/S1995421219010027

## Информация об авторах

**КОМКОВ Михаил Андреевич** — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: m\_komkov@list.ru).

**ТИМОФЕЕВ Михаил Петрович** — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: sm5-3@yandex.ru).

**ЛАРИОНОВА Анастасия Владимировна** — сотрудник. Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119334, Москва, Российская Федерация, Ленинский пр-т, д. 49, e-mail: mlarionov@imet.ac.ru).

## Information about the authors

**KOMKOV Mikhail Andreevich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Technology of Rocket-and-Space Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: m\_komkov@list.ru).

**TIMOFEEV Mikhail Petrovich** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Technology of Rocket-and-Space Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: sm5-3@yandex.ru).

**LARIONOVA Anastasiya Vladimirovna** — Faculty Member. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences (119334, Moscow, Russian Federation, Leninskiy Ave., Bldg. 49, e-mail: mlarionov@imet.ac.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Комков М.А., Тимофеев М.П., Ларионова А.В. Оценка эксплуатационных характеристик коротковолокнистой базальтовой теплоизоляции при криогенных температурах. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 7, с. 59–68, doi: 10.18698/0536-1044-2020-7-59-68

### Please cite this article in English as:

Komkov M.A., Timofeev M.P., Larionova A.V. An Evaluation of Performance Characteristics of Short-Fiber Basalt Insulation at Cryogenic Temperatures. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 7, pp. 59–68, doi: 10.18698/0536-1044-2020-7-59-68



## В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышло в свет учебное пособие П.П. Телепнева, Д.А. Кузнецова «Основы проектирования виброзащиты космических аппаратов»

Рассмотрены основы проектирования виброзащиты прецизионных космических аппаратов для улучшения разрешающей способности устанавливаемой на борту целевой аппаратуры при влиянии динамических источников возмущений. Представлены методы и средства виброзащиты, а также принципы работы, математические модели и практические примеры создания виброзащитных устройств. Приведен инженерный алгоритм в виде структурной схемы обеспечения виброзащиты космических конструкций для практической реализации.

### По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru