

Разработка и исследование термостойких покрытий трубопроводов из коротких базальтовых волокон

© М.А. Комков, Ю.В. Баданина, М.П. Тимофеев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Статья посвящена одной из важных задач развития машиностроения — получению легковесных, негорючих, экологически чистых и экономически эффективных теплоизоляционных материалов. Показано, что для теплоизоляционного покрытия напорно-компрессорных труб (НКТ), работающих при температурах до 420°C, наиболее эффективной теплоизоляцией является высокопористый материал на основе базальтового волокна. Исследован процесс фильтрационного осаждения из жидкой пульпы коротких базальтовых волокон со связкой из глинозема теплоизоляционных покрытий НКТ в виде цилиндров и цилиндрических скорлуп. На основании теплофизических характеристик базальтовых волокон и технологических особенностей изготовления покрытий определена толщина высокопористой теплоизоляции НКТ. При длительной прокачке воздуха с рабочей температурой 400 °С через модельные образцы НКТ с теплоизоляцией и защитным слоем установлено, что температура на поверхности теплозащитного покрытия не превышает 60 °С.

Ключевые слова: насосно-компрессорные трубы, теплоизоляция, базальтовое волокно, коэффициент теплопроводности, пористость, фильтрационное осаждение, цилиндрические кольца, скорлупы, погонная масса.

Важным направлением развития машиностроения является разработка новых конструкторских решений и материалов с высокими эксплуатационными характеристиками. В связи с этим получение легковесных, негорючих, экологически чистых и экономически эффективных теплоизоляционных материалов (ТИМ) на основе коротких базальтовых волокон и минеральной связки, работоспособных при температурах до 750°C, является актуальным. Очень часто оригинальные разработки, выполненные для функционирования изделий авиационной и ракетно-космической техники (РКТ), служат в дальнейшем для решения совершенно иных или похожих задач в других отраслях промышленности, и наоборот.

Одной из наиболее важных и перспективных отраслей является нефтедобывающая промышленность. Большинство запасов нефти на территории Российской Федерации (более 70%) — это тяжелая, трудно извлекаемая нефть повышенной вязкости и плотности. Для ее добычи используют физические (ультразвук), химические или термические методы разогрева пластов. Химические методы требуют больших затрат и к тому же оказывают отрицательное воздействие на окружающую среду, поэтому все более популярными становятся термические методы как экономически более выгодные.

Термический разогрев пласта и призабойной зоны осуществляют путем длительной закачки в пласт сухого перегретого пара с высокими начальными параметрами (температурой 400...450 °С и давлением 32...35 МПа [1–3]). Для подачи теплоносителя в пласт необходимо разработать и изготовить эффективную теплоизоляцию напорно-компрессорных труб (НКТ) таким образом, чтобы в приповерхностной зоне скважины за обсадной трубой температура цементного камня была не более 60 °С.

В качестве материала для теплоизоляции НКТ, длительное время (до трех месяцев) работающего при температурах до 450 °С, может быть использован теплозащитный материал марки ТЗМК-10 [4] на основе мелкодисперсного кварцевого волокна диаметром 1,5...2,0 мкм и длиной 1,2...3,2 мм, созданный для изготовления теплозащитных плиток ВКС «Буран». Высокопористый (92...94%) и коротковолокнистый материал существенно ослабляет лучистый теплообмен путем рассеивания и эффекта многократного экранирования, а также уменьшает теплопроводность по воздуху за счет затруднения конвективного переноса. К недостаткам ТЗМК-10 можно отнести лишь высокую стоимость производства этого материала и несколько повышенный коэффициент теплопроводности (0,06 Вт/(м·К)) при нормальной температуре.

Более дешевая, но не менее эффективная теплоизоляция, работоспособная при температурах до 750 °С, может быть создана из короткого базальтового волокна. Проведенные нами экспериментальные исследования на модельных теплоизолированных образцах труб [5–7] показали, что теплоизоляционный материал на основе супертонкого (диаметром 1,5...3,0 мкм) базальтового волокна и связки из глинозема при нагреве образцов до температуры 400...450 °С обладает низким коэффициентом теплопроводности, в среднем равным 0,0415 Вт/(м·К). При этом теплоизоляционный материал на основе базальтового волокна проявляет большую сопротивляемость высоким температурам и химически стабилен.

Основным технологическим методом изготовления ТИМ из коротких базальтовых волокон является метод фильтрационного осаждения волокон из жидкой пульпы, который рассмотрен в работах [7, 8] и применяется при формовании теплозащитных плиток и цилиндрических колец небольшой высоты.

В то же время перспективное теплоизоляционное покрытие (ТИП) длинномерных НКТ в связи с конструктивно-технологическими ограничениями нельзя изготовить из сплошных цилиндрических колец. Оно может быть выполнено только из скорлуп примерно метровой длины с последующей сборкой их в замок по образующим цилиндра. В связи с этим необходимо определить геометрические, структурные и физико-механические характеристики высокопористого теплоизоляционного материала термостойких цилиндрических скорлуп, полученных из коротких базальтовых волокон методом фильтрационного осаждения.

Для проведения теплофизических исследований был разработан материал на основе базальтовых волокон, имеющих следующий химический состав: SiO_2 — 48...52 %, Al_2O_3 — 16...18 %, Fe_2O_3 — 7...11 %, CO — 7...10 %, MgO — 4...8 %, TiO_2 — 1...2 %, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ — 3...5 % [5] и 5...6 % связки из Al_2O_3 на основе раствора сернокислого алюминия. Для изготовления опытных образцов сложнопрофильных цилиндрических скорлуп (рис. 1) была спроектирована и изготовлена необходимая технологическая оснастка.

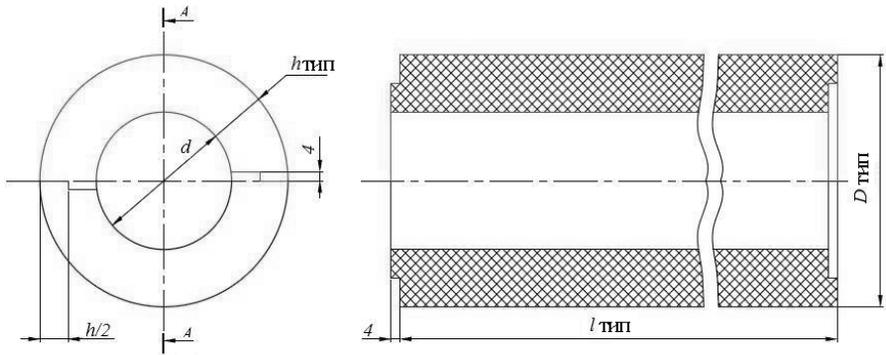


Рис. 1. Геометрия цилиндрических скорлуп из коротких базальтовых волокон; $d = 60$ мм; $l_{\text{тип}} = 1000$ мм

Проведение экспериментов

Для того чтобы определить толщину теплоизоляционного покрытия, рассмотрим конструктивные особенности и теплофизические характеристики современных теплоизолированных НКТ. В настоящее время для закачки в пласт перегретого пара применяют НКТ с вакуумной теплоизоляцией (рис. 2) [9], которые выполнены в виде конструкции «труба в трубе» с вакуумированием межтрубного пространства и дополнительной установкой отражательных экранов или теплоизоляции ТЗМК-25 [4] вместо экранов.

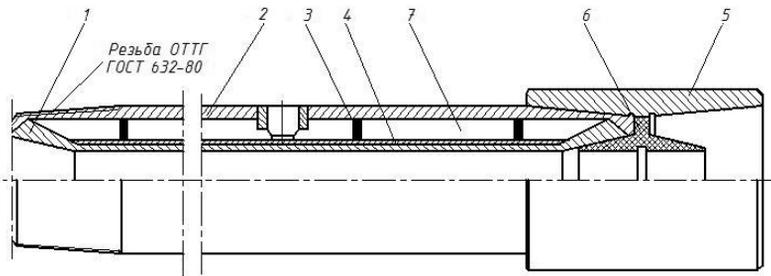


Рис. 2. Теплоизолированная НКТ с вакуумной теплоизоляцией:
 1 — труба внутренняя с профилированными концами ($d_y = 40$ мм; 62 мм);
 2 — труба наружная ($D_{\text{тр}} = 89$ мм; 114 мм); 3 — центраторы; 4 — изоляция, расположенная на внутренней трубе; 5 — муфта; 6 — уплотнительная втулка с канавкой; 7 — вакуум

Однако вакуумно-теплоизолированные НКТ, которые называются также «термокейсами», не в полной мере удовлетворяют производственным потребностям нефтяников по уровню теплопотерь и надежности вакуумирования конструкции трубы. Главным же недостатком таких НКТ является излишняя погонная масса конструкции и, как следствие, невозможность применения их для глубоких скважин.

Для снижения погонной массы теплоизоляции НКТ рассмотрим покрытие, выполненное из коротких базальтовых волокон с внешней герметизирующей и защитной оболочкой из стеклопластика. Ориентируясь на характеристики вакуумно-изолированных НКТ [9], для которых допустимой считается потеря теплового потока по длине трубы $q_1 = 150$ Вт/м, можно предварительно рассчитать толщину теплоизолирующего покрытия (ТИП) из базальтовых волокон по формуле

$$q = \frac{q_1}{\pi d} = \frac{2 \lambda_{\text{ТИП}} (T_1 - T_2)}{d \ln \frac{d + 2h_{\text{ТИП}}}{d}}, \quad (1)$$

где $d = 60$ мм — наружный диаметр НКТ; $\lambda_{\text{ТИП}}$ — среднее значение коэффициента теплопроводности базальтового покрытия в диапазоне температур $(T_1 - T_2)$, $T_1 = 400$ °С — температура на внутренней стенке трубы НКТ, $T_2 = 60$ °С — температура на наружной стороне покрытия трубы НКТ; $h_{\text{ТИП}}$ — толщина теплоизоляции НКТ.

Зависимости коэффициентов теплопроводности от температуры соответственно для базальтовых волокон и спокойного воздуха представлены на рис. 3 [10]. Анализ графиков позволяет определить средние значения коэффициентов теплопроводности в диапазоне температур 60...400 °С для базальтового волокна — $\lambda_{\text{б.в}} = 0,055$ Вт/(м·К) и для воздуха — $\lambda_{\text{возд}} = 0,041$ Вт/(м·К).

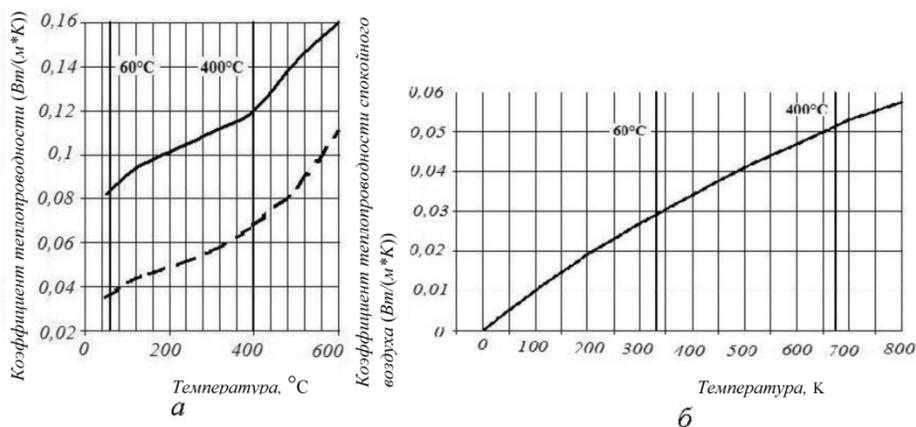


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры: а — для базальтового и кремнеземного волокон (--- — базальтовое волокно; — — кремнеземное волокно); б — для спокойного воздуха

Считая, что пористость $\varepsilon = \frac{V_{\text{пор}}}{V_{\text{тип}}}$ теплоизоляции из базальтовых волокон, как и для ТЗМК-10, можно получить равной 0,92...0,93, найдем среднее значение коэффициента теплопроводности материала покрытия:

$$\lambda_{\text{ТИП}}^{\text{ср}} = (1 - \varepsilon)\lambda_{\text{б.в}}^{\text{ср}} + \varepsilon\lambda_{\text{возд}}^{\text{ср}} = 0,0408 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}. \quad (2)$$

Подставив $\lambda_{\text{ТИП}}^{\text{ср}}$ из (2) в (1), определим толщину теплоизоляции для трубы НКТ: $h_{\text{ТИП}} = 25$ мм. При пористости 93 % и плотности базальтовых волокон $\rho_{\text{б.в}} = 2750 \text{ кг/м}^3$ разработанный теплоизоляционный материал имеет плотность $\rho_{\text{ТИМ}} = 195 \text{ кг/м}^3$ и прочность на сжатие при 10%-ной деформации, равную 0,42 МПа.

Погонную массу теплоизоляции трубы НКТ из базальтовых волокон и защитной оболочки из намотанного стеклопластика определим по формулам

$$M_{\text{ТИП}} = \frac{\pi}{4}(d_{\text{ТИП}}^2 - d_{\text{НКТ}}^2)\rho_{\text{ТИМ}}; M_{\text{СП}} = \frac{\pi}{4}(D_{\text{СП}}^2 - d_{\text{ТИП}}^2)\rho_{\text{СП}}, \quad (3)$$

где $d_{\text{ТИП}} = 110$ мм — наружный диаметр теплоизоляции; $d_{\text{НКТ}} = 60$ мм — диаметр трубы НКТ; $D_{\text{СП}} = 114$ мм — диаметр стеклопластиковой оболочки; $D_{\text{СП}} = 2,05 \text{ кг/м}^3$ — плотность стеклопластика. Подставив числовые значения в формулы (3), получим: $M_{\text{ТИП}} = 1,44 \text{ кг/м}$, масса стеклопластиковой оболочки с герметизирующим слоем $M_{\text{СП}} = 1,47 \text{ кг/м}$, что в сумме с погонной массой стальной НКТ диаметром 60 мм, равной 6,8 кг/м, составит 9,7 кг/м. Это, соответственно, в 2,02 и 3,33 раза меньше погонной массы труб НКТ с вакуумной теплоизоляцией (см. рис. 2).

На рис. 4, а показана схема формообразования методом жидкостной фильтрации из коротких базальтовых волокон теплоизоляционных цилиндрических колец небольшой высоты; на рис. 4, б — образец таких колец.

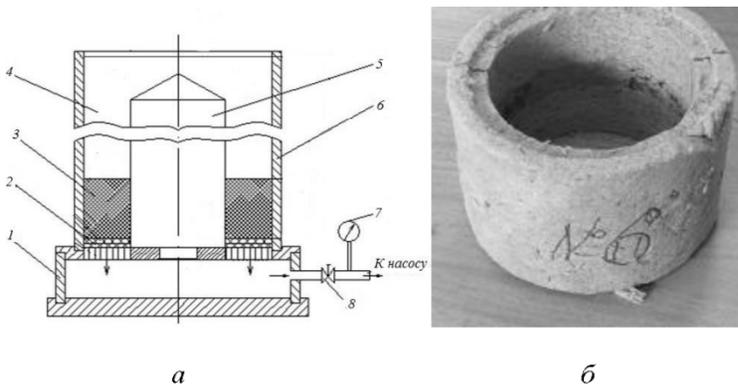


Рис. 4. Схема фильтрационного осаждения волокон из пульпы (а) и цилиндрический образец ТИП на основе базальтового волокна и глинозема (б): 1 — камера; 2 — фильтровальная перегородка; 3 — слой осадка ТИМ; 4 — пульпа; 5 — оправка; 6 — корпус (труба); 7 — вакуумметр; 8 — запорный вентиль

Однако изготовление длиномерных (около метра) цилиндрических покрытий указанным способом становится неприемлемым из-за формирования неоднородной структуры материала по длине цилиндра и чрезмерной длительности процесса формования.

Проведенные исследования показали, что с целью сокращения времени изготовления цилиндрических теплоизоляционных скорлуп и последующей их сборки на НКТ необходимо применять схему формования с плоскости образующей цилиндра (рис. 5). В этом случае за короткое время ($t \approx 5$ мин) производят осаждение до 85 % объема волокон, а затем, не прерывая процесса, вводят оправку-пуансон, после чего фильтрация волокон и формование замка ТИП заканчиваются. При такой схеме фильтрации высота столба пульпы резко снижается, что упрощает и конструкцию технологической оснастки.

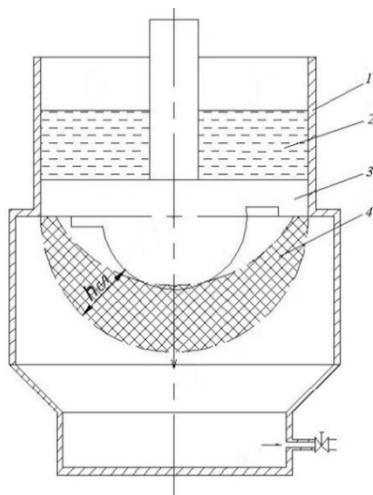


Рис. 5. Схема формования цилиндрических скорлуп из коротких базальтовых волокон (а) и вид собранных скорлуп (б):

1 — камера; 2 — пульпа; 3 — пуансон; 4 — первоначальный слой осадка; $h_{сл}$ — толщина получаемого теплоизолированного изделия на основе базальтовых волокон, мм

Экспериментальное определение теплофизических характеристик ТЗП НК-Т трубы проводили на тепловом стенде [1–2] по схеме, представленной на рис. 6. Для исследования выбрали стальную трубу (наружный диаметр 60 мм, толщина стенки 5 мм, длина 800 мм), на которую надевали кольцевые секции ТИМ (рис. 4, б) с внешним диаметром 110 мм и высотой 120 мм. Сверху на кольца ТИМ наносили экранирующий слой, на который в поперечном направлении наматывали слой стеклопластика толщиной 2 мм. После полимеризации связующего образец теплоизолированной трубы устанавливали в тепловой стенд (см. рис. 6) для температурных испытаний. Показания датчиков температуры (1–3) на поверхности покрытия образца теплоизолированной НКТ и датчика температуры горячего воздуха (4),

прокачиваемого через трубу, представлены ниже: При длительной прокачке воздуха температурой 400 °С установившаяся температура на внешней поверхности многослойного теплоизоляционного покрытия НКТ не превышала 60 °С.

Экспериментальные значения температуры на внутренней и внешней поверхности теплоизолированной трубы НКТ

Температура, °С:

внешней поверхности трубы.....	350	380	410	450
на поверхности покрытия.....	49	52	54	59

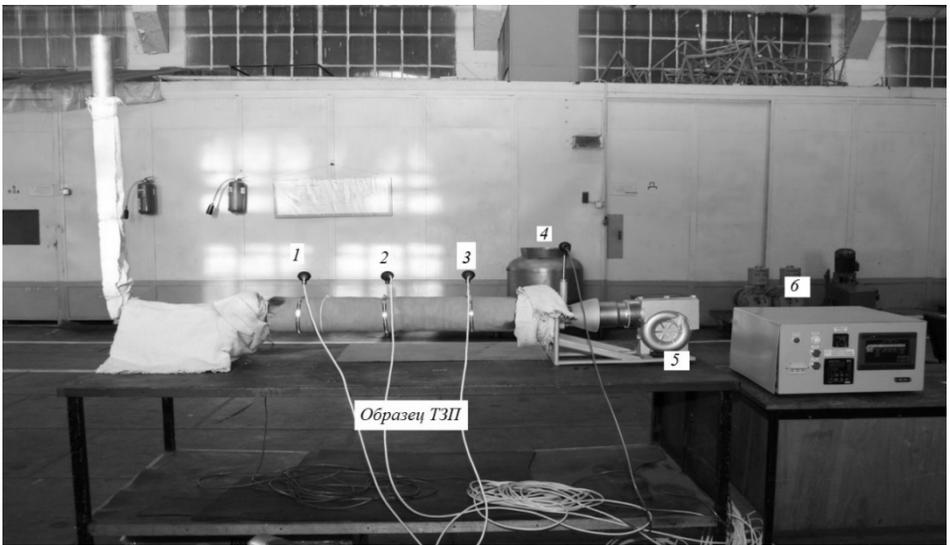


Рис. 6. Температурные испытания модельных образцов теплоизолированной НКТ на тепловом стенде:

1–3 — датчики температуры поверхности образца; 4 — датчик температуры горячего воздуха; 5 — тепловентилятор; 6 — шкаф системы управления

В результате отработан состав теплоизоляционного материала с пористостью 93 % на основе супертонкого базальтового волокна и 5 % связки из глинозема. На основе метода фильтрационного осаждения разработана технология изготовления из коротких базальтовых волокон цилиндрических колец и длинномерных скорлуп. Расчетным путем определены теплофизические характеристики, толщина и погонная масса волокнистого теплоизоляционного покрытия трубы НКТ, которая оказалась вдвое меньше погонной массы вакуумно-теплоизолированных труб, эксплуатируемых в том же интервале температур. Экспериментально установлено, что при длительной прокачке воздуха с температурой 400 °С через модельные образцы многослойной теплоизолированной НКТ температура на наружной поверхности теплозащитного покрытия не превышает 60 °С.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Моисеев В.А., Андриенко В.Г., Фролов В.И., Клокотов Ю.Н. Теплоизоляция нефтепромысловых паропроводов для транспортировки пара с критическими параметрами. *Нефтяное хозяйство*, 2012, № 1, с. 92–94.

[2] Моисеев В.А., Моисеев А.В., Комков М.А., Фролов В.И. Высокотемпературный энергосберегающий нефтепромысловый паропровод. *Биржа Интеллектуальной Собственности*, 2012, № 9, с. 57–60.

[3] Моисеев В.А., Моисеев А.В., Фролов В.И., Комков М.А. Труба теплоизолированная. Пат. на полезную модель 121855 Российская Федерация, 2012, бюл. № 31, 3 с.

[4] *Авиационно-космические системы*. Лозино-Лозинский Г.Е., Братухин А.Г., ред. Москва, Изд-во МАИ, 1997, 416 с.

[5] Филимонов А.С., Тарасов В.А., Комков М.А. Экспериментальный анализ свойств перспективных теплоизоляционных материалов машиностроения, полученных методом фильтрационного осаждения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2012, вып. № 9, <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/382.html>

[6] Филимонов А.С., Тарасов В.А., Комков М.А. Влияние связующих на свойства новых теплоизоляционных покрытий с использованием стеклянных микросфер. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2012, вып. № 9, <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/383.html>

[7] Тимофеев М.П. *Разработка и исследование фильтрационной технологии изготовления изделий из волокнистых неорганических материалов*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007, 16 с.

[8] 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.

[9] Кудимов В.И., Богомольный Е.И., Завьялов М.П., Багиров Г.Р. *Теплоизолированная колонна (термоизолированная труба НКТ)*. Пат. 2129202 Российская Федерация, 1999, бюл. № 4, 9 с.

[10] Богданов С.Н., Бурцев С.И., Иванов О.П., Куприянова А.В. *Холодильная техника. Кондиционирование воздуха*. Санкт-Петербург, Изд-во СПбГАХИПТ, 1999, 320 с.

Статья поступила в редакцию 19.03.2014

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Комков М.А., Баданина Ю.В., Тимофеев М.П. Разработка и исследование термостойких покрытий трубопроводов из коротких базальтовых волокон. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, вып. 2.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/hidden/1203.htm>

Комков Михаил Андреевич родился в 1938 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1966 г. Автор более 130 научных работ в области технологии машиностроения и композитных конструкций. e-mail: m_komkov@list.ru

Баданина Юлия Владимировна родилась в 1990 г. Окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2013 г. Аспирант кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 4 научных публикаций в области космического машиностроения. e-mail: julia555-90@yandex.ru

Тимофеев Михаил Петрович родился в 1957 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1986 г. Автор более 15 научных работ в области технологии машиностроения. e-mail: sm5-3@yandex.ru

Developing and testing heat-resistant pipelines coatings made of short basalt fibers

© M.A. Komkov, Yu.V. Badanina, M.P. Timofeev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article is devoted to one of the most important and urgent tasks in engineering development — obtaining lightweight, non-flammable, environmentally friendly and cost-effective insulating materials. The study shows that the highly porous basalt fiber material is the most efficient insulation for heat-insulating coating of pump-compressor pipes (PCP), operating at temperatures up to 420 °C. The study tested the process of filtration deposition of short basalt fibers with mineral binder from alumina of heat-insulating PCP coatings in the form of cylinders and cylindrical shell. The research relies on the thermal characteristics of basalt fibers and technological features of manufacturing highly porous coating and results in determining the thickness of highly porous insulating PCP coating. During continuous hot air pumping through the PCP samples with thermal insulation and a protective layer of fiberglass it was possible to experimentally establish the heat conductivity coefficient of the multilayer material.

Keywords: pump-compressor pipes, heat insulation, basalt fiber, heat conductivity coefficient, porosity, filtration deposition, cylindrical rings, shells, mass per unit length.

REFERENCES

- [1] Moiseev V.A., Andrienko V.G., Frolov V.I., Klokov Yu.N. *Neftyanoe khozyaistvo — Oil industry*, 2012, no. 1, pp. 92–94.
- [2] Moiseev V.A., Moiseev A.V., Komkov M.A., Frolov V.I. *Birzha Intellektual'noi Sobstvennosti — Intellectual Property Exchange*, 2012, no. 9, pp. 57–60.
- [3] Moiseev V.A., Moiseev A.V., Frolov V.I., Komkov M.A. *Truba teploizolirovannaya* [Heat insulated pipe]. Utility patent 121855 Russian Federation, 2012, bull. no 31, 3 p.
- [4] Lozino-Lozinskiy G.E., Bratukhin A.G., eds. *Aviatsionno-kosmicheskie sistemy* [Aerospace systems]. Moscow, MAI Publ., 1997, 416 p.
- [5] Filimonov A.S., Tarasov V.A., Komkov M.A. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2012, iss. 9. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/382.html>
- [6] Filimonov A.S., Tarasov V.A., Komkov M.A. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2012, iss. 9. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/383.html>
- [7] Timofeev M.P. *Razrabotka i issledovanie fil'tratsionnoi tekhnologii izgotovleniya izdeliy iz volknistykh neorganicheskikh materialov* [Development and investigation of filtration technology manufacture of fibrous inorganic materials]. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. [Abstract of the PhD thesis]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2007, 16 p.
- [8] Tarasov V.A., Smirnov Yu.V., Timofeev M.P., Filimonov A.S. *Polet. Obshcherossiyskiy nauchno-tekhnicheskii zhurnal — Flight. The Russian Scientific and Technical Journal*, 2007, no. 5, pp. 52–55.
- [9] Kudimov V.I., Bogomol'nyi E.I., Zav'yalov M.P., Bagirov G.R. *Teploizolirovannaya kolonna (termoizolirovannaya truba NKT)* [Heat-insulated column (Heat-insulated pump-compressor pipe)]. Utility patent 2129202 Russian Federation, 1999, bull. no. 4, 9 p.
- [10] Bogdanov S.N., Burtsev S.I., Ivanov O.P., Kupriyanova A.V. *Kholodil'naya tekhnika. Konditsionirovanie vozdukha* [Refrigerating engineering. Air conditioning]. St. Petersburg, SPbGAKhPT Publ., 1999, 320 p.

Komkov M.A. (b. 1938) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1966. Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department "Rocket and Space Technology Engineering " at Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 130 scientific papers in the field of engineering technology and composite structures. e-mail: m_komkov@list.ru

Badanina Yu.V. (b. 1990) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2013. Postgraduate student of the Department "Rocket and Space Technology Engineering" at Bauman Moscow State Technical University. Author of 4 scientific publications in the field of space engineering. e-mail: julia555-90@yandex.ru

Timofeev M.P. (b. 1957) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1986. Ph.D., Assoc. Professor of the Department "Rocket and Space Technology Engineering" at Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 15 scientific papers in the field of engineering technology. e-mail: sm5-3@yandex.ru