

Опыт создания насосно-компрессорных труб для нефтедобычи с теплоизоляцией на основе базальтовых и стеклянных волокон

© М.А. Комков, В.А. Тарасов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Представлены результаты конструкторских разработок, технологий изготовления и экспериментальных исследований опытных образцов многослойных насосно-компрессорных труб с теплоизоляцией из коротких базальтовых волокон и внешней оболочкой из намотанного стекловолокна. Рассмотрена спроектированная новая многослойная конструкция трубы с упрочнением композитного наружного слоя в области силового воздействия гидравлических ключей при монтаже и опускании в нефтяные скважины. Установлено, что высокотемпературная и низкотемпературная теплоизоляция труб может быть выполнена из коротких базальтовых супертонких волокон путем их измельчения и очистки от примесей жидкостным способом. Проведенные на сертифицированном оборудовании тепловые и прочностные испытания образцов труб с укороченной регулярной частью показали значение допустимой температуры на внешней поверхности покрытия, а также превышающий более чем в 2 раза запас прочности стеклопластиковой оболочки на растяжение и кручение.

Ключевые слова: нефтедобыча, насосно-компрессорная труба, теплоизоляция, короткие базальтовые волокна, коэффициент теплопроводности, стеклопластиковая оболочка, тепловые и прочностные испытания

Введение. Основное направление в освоении высоковязких и трудно извлекаемых запасов нефти [1, 2] — применение длительного паротеплового воздействия на нефтеносные пласты. Для эффективного воздействия на пласт требуются парогенераторы с критическими начальными параметрами (температура перегретого пара 420...450 °С, давление 35 МПа и более [3, 4]) и теплоизолированные насосно-компрессорные трубы (НКТ), обеспечивающие доставку такого теплоносителя в призабойную зону скважины с температурой 420 °С под давлением 35 МПа.

В настоящее время для закачки в пласт перегретого пара применяются двухслойные стальные вакуумно-теплоизолированные НКТ — термокейсы с низким рабочим давлением (16 МПа) и температурой прокачиваемого пара до 325 °С. Термокейсы имеют большую погонную массу, равную 19,6 кг/м и 32,3 кг/м при проходном диаметре 40 мм и 62 мм соответственно [2], что ограничивает их применение в скважинах глубиной более 1,5 км.

Для длительной закачки в нефтеносный пласт теплоносителя с высокими параметрами необходимо создать эффективную тепло-

изоляцию НКТ из композитных материалов таким образом, чтобы температура на наружной поверхности трубы в ее регулярной части не превышала 60...65 °С, а погонная масса теплоизолированной НКТ с проходным диаметром 50 мм и с намотанной защитно-силовой стеклопластиковой оболочкой диаметром 114 мм составляла не более 11...12 кг/м [5].

Цель настоящей работы — представить результаты теоретических исследований, проектных разработок и экспериментально полученные характеристики новой многослойной конструкции насосно-компрессорной трубы с теплоизолирующим композиционным покрытием из базальтовых и стеклянных волокон для закачки перегретого до температуры 420 °С пара под давлением до 35 МПа в нефтяной пласт глубиной до 3000 м.

Конструкция трубы. Спроектирована теплоизолированная насосно-компрессорная труба с проходным диаметром 50 мм и длиной до 11,5 м (рис. 1) с композитным покрытием в регулярной части диаметром 114 мм. Труба имеет две законцовки диаметром 132 мм и силовые секции спайдера и гидравлического ключа диаметром 122 мм, длиной 300 мм, предназначенных для сборки–разборки (свинчивания–развинчивания) отдельных НКТ между собой и удержания всей колонны труб при опускании ее в ствол скважины.

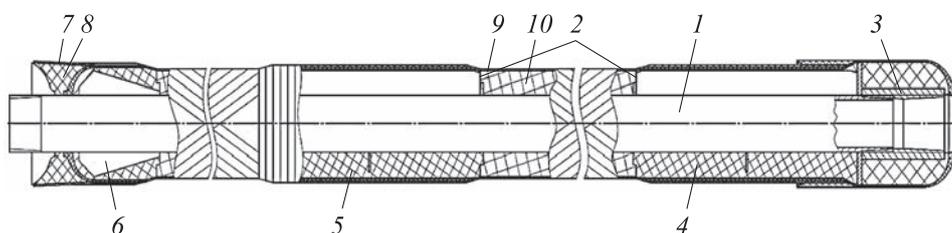


Рис. 1. Конструктивная схема многослойной композитной насосно-компрессорной трубы:

1 — стальная труба с силовыми элементами; 2 — регулярная часть НКТ; 3 — муфта с конической резьбой; 4 — секция спайдер-ключа; 5 — секция гидравлического ключа; 6 — секция днище-опора стеклопластиковой оболочки; 7 — раструб из стеклопластика; 8, 10 — теплоизоляционное покрытие трубы в виде цилиндрических скорлуп и манжеты из коротких базальтовых супертонких волокон; 9 — стеклопластиковая намотанная оболочка

Регулярная часть НКТ включает в себя металлическую трубу из стали 20Х3МВФ с диаметром 60 мм и толщиной стенки 5 мм с приваренными к ней силовыми элементами, на которую устанавливают (собирают) теплоизоляцию в виде полуцилиндров (рис. 2), изготовленных из коротких базальтовых супертонких волокон (БСТВ) и связки из Al_2O_3 методом жидкостной фильтрации.

Сверху на базальтовые скорлупы наматывают выполняющий функцию отражательного экрана один двойной слой алюминиевой фольги, предохраняющий от попадания полимерного связующего

в высокопористую теплоизоляцию. На фольгу под углом $\pm 30^\circ$ к оси изделия наматывают защитно-силовую оболочку в четыре двойных слоя однонаправленного стеклопластика толщиной 2 мм, которые определены из условия геодезической намотки и прочности оболочки на разрыв.

Экспериментальную отработку конструктивно-технологических решений многослойной теплоизолированной НКТ проводили на опытных образцах труб укороченной длины. При этом все геометрические размеры, параметры законцовок и силовых секций вплоть до регулярной части многослойной теплоизолированной НКТ были сохранены. Длина опытного образца НКТ составила 2463 мм, ее регулярной части — 900 мм вместо проектных (натурных) 9...10 м.

Разработанное конструктивно-технологическое решение НКТ можно считать перспективным. С одной стороны, оно снижает погонную массу НКТ с композитной теплоизоляцией в 2–2,5 раза по сравнению с массой применяемых двухслойных вакуумно-теплоизолированных НКТ — термокейсов [2], с другой стороны, обеспечивает закачку теплоносителя (перегретого пара) с высокими начальными параметрами (температура 420 °С, давление 35 МПа) в нефтяные пласты с высоковязкой нефтью на глубину 3000...3500 м.

Теплоизоляционное покрытие. На опытных НКТ теплоизоляционное покрытие (ТИП) выполнено из коротких базальтовых супертонких волокон [5–8] со средним диаметром 1,82 мкм и длиной 1,0...1,5 мм (рис. 3) с 6...7%-ной (мас.) связкой из Al_2O_3 в виде полуцилиндров (скорлуп, см. рис. 2), установленных между стальной трубой и защитно-силовой стеклопластиковой оболочкой. В диапазоне температур 60...420 °С коэффициент теплопроводности материала скорлуп в 1,5 раза меньше, чем у теплозащитного материала ТЗМК-25 [9] из коротких кварцевых волокон, который установлен в межстенном пространстве НКТ — термокейсов.

Двустадийный технологический процесс изготовления деталей теплоизоляции (скорлупы, манжета) включает дезинтеграцию в воде БСТВ (штапель) в механических пропеллерных мешалках, где одновременно с измельчением штапельных волокон происходит отделение (очистка) коротких волокон от неволокнистых включений или мусора. Время дезинтеграции исходных (50...60 мм) базальтовых



Рис. 2. Общий вид цилиндрических скорлуп, полученных методом жидкостной фильтрации из коротких базальтовых супертонких волокон

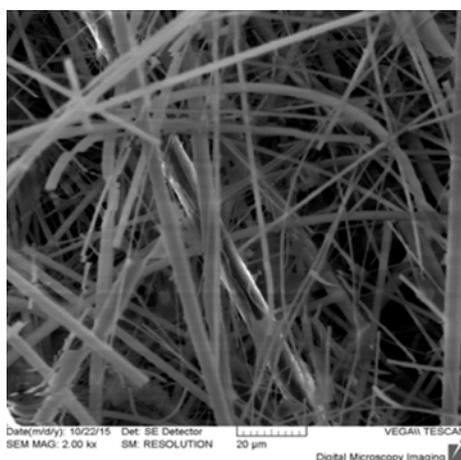


Рис. 3. Микроструктура материала теплоизоляционного покрытия на основе коротких базальтовых супертонких волокон со связкой из оксида алюминия

волокон до длины 1,0...1,5 мм по результатам экспериментов составляет 8...15 мин. Полученную гидромассу сливают в пресс-форму и сушат в термопечи до полного удаления влаги ($\leq 1...2\%$) при температуре $(185\pm 5)^\circ\text{C}$ в течение 2 ч [8]. В процессе изготовления скорлуп ТИП исходный полуфабрикат из коротких базальтовых волокон распускают в воде и вводят гидроокись алюминия в волокнистую пульпу. Процесс формования профильных деталей производят методом фильтрационного осаждения коротких волокон из пульпы в пресс-форму. После удаления влаги (сушки изделия) и термообработки при температуре $\geq 450^\circ\text{C}$ в материале покрытия образуется необходимая (6-7 %) связка из оксида алюминия от массы волокон, установленная экспериментами на сжатие образцов ТИП [11].

Готовые покрытия НКТ в виде скорлуп имеют геометрические размеры: $D_{\text{тип}} = 110\pm 0,2$ мм; $d_{\text{тр}} = 60\pm 0,2$ мм; $l_{\text{тип}} = 255\pm 0,2$ мм; $h_{\text{тип}} = 25\pm 0,2$ мм. Средняя масса скорлуп равна 0,1325 кг ($\pm 2,55\%$), плотность материала — 156 кг/м^3 , пористость волокнистой композиции составляет 94 %. Коэффициент теплопроводности материала ТИП в диапазоне температур 63...420 °C равен 0,0413 Вт/(м·К).

Тепловые испытания. Теплоизоляцию композитных НКТ [10, 11] подвергают тепловым испытаниям горячим воздухом на тепловом стенде, разработанном в СибГАУ им. М.Ф. Решетнёва, в целях определения температуры внешней поверхности покрытий в зависимости от внутреннего нагрева стальной трубы до температуры 350...420 °C (рис. 4). Из анализа результатов измерений тепловых характеристик (рис. 5) следует, что на внешней поверхности регулярной части НКТ температура имеет приемлемое согласно техническому заданию (ТЗ) значение ($63\pm 3^\circ\text{C}$). Таким образом, результаты экспериментальных исследований показали, что теплоизоляционное покрытие на основе коротких БСТВ, связки из Al_2O_3 и намотанной стеклопластиковой оболочки работает эффективно.

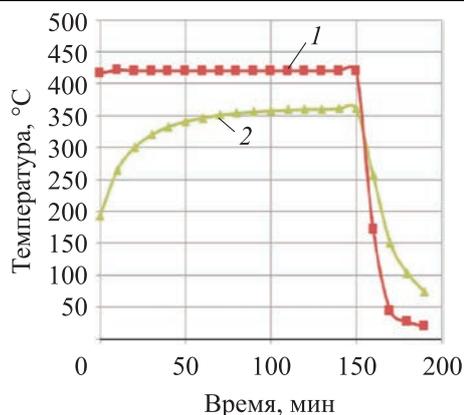


Рис. 4. Изменение во времени температуры воздуха на входе 1 и выходе 2 НКТ при тепловых испытаниях

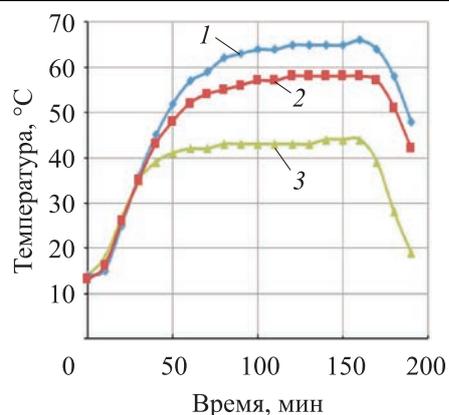


Рис. 5. Изменение во времени показаний датчиков температуры на регулярной части 1, 2 и силовых секциях 3 трубы НКТ

Прочностные испытания НКТ. На испытательном стенде УС-600 в ООО «ВНИИТнефть» (Самарская обл.) были проведены прочностные испытания НКТ с композитным покрытием на осевую растягивающую силу стеклопластиковой оболочки до разрыва. Насосно-компрессорную трубу устанавливают на стенде УС-600 (рис. 6) в вертикальном положении и зажимают спайдер-ключом. Осевую растягивающую силу прикладывают через резьбовую муфту в области секции днища-опоры, а нагрузку на стеклопластиковую оболочку повышают до ее разрушения. В ходе испытаний было зафиксировано разрушение стеклопластиковой оболочки при нагрузке в 48 тс. Общий вид разрушения трубы показан на рис. 7, где видны все слои внешней многослойной оболочки НКТ: структура ТИП из



Рис. 6. Общий вид стенда УС-600 при испытании на растяжение стеклопластиковой оболочки насосно-компрессорной трубы



Рис. 7. Фрагмент насосно-компрессорной трубы после разрушения стеклопластиковой оболочки при осевой нагрузке в 48 тс на стенде УС-600

коротких волокон, слой из алюминиевой фольги и слой стеклопластика, намотанный под углом к оси изделия.

Испытания НКТ на крутящий момент (рис. 8) были выполнены на стенде для сборки насосно-компрессорных труб СТС-2500 в ООО «ВНИИТнефть». Проведены испытания силовой зоны захвата спайдера, силовой зоны захвата гидравлического ключа и воздействия сухарей с рифлями давлением обжатия ключа на стеклопластиковую оболочку опытных образцов теплоизолированных труб при нагружении крутящим моментом до начала разрушения любой зоны образцов.

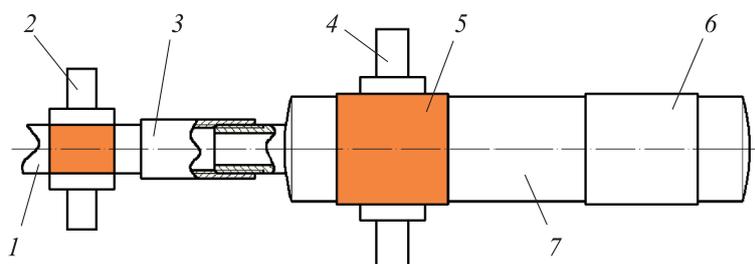


Рис. 8. Схема испытаний на кручение стеклопластиковой оболочки насосно-компрессорной трубы:

1 — образец НКТ длиной 0,4 м; 2 — задержка ключа КГС-12; 3 — муфта; 4 — вращатель ключа КГС-12; 5 — зона гидравлического ключа; 6 — зона спайдера; 7 — опытный образец

При испытании стеклопластиковой оболочки между захватом гидравлического ключа КГС и резьбовой муфтой НКТ (рис. 9) выполнено 10 этапов свинчивания–развинчивания по 3 цикла на каждом этапе. При крутящем моменте 9540 Н·м (~954,0 кгс·м), который в 3,82 раз больше момента свинчивания НКТ по ТЗ проекта, равного 2500 Н·м (~250,0 кгс·м), испытания были остановлены.



Рис. 9. Общий вид испытаний крутящим моментом стеклопластиковой оболочки насосно-компрессорной трубы на стенде СТС-2500



Рис. 10. Зона захвата спайдера после испытания насосно-компрессорной трубы крутящим моментом 9540 Н·м

Силовые зоны стеклопластиковой оболочки при обхвате как ключом КГС-12, так и ключом спайдера под давлением 50 МПа оставались без заметных следов разрушения или выкрашивания поверхности от воздействия сухарей с рифлями (рис. 10).

Заключение. Спроектирована новая конструкция и разработана оригинальная технология изготовления насосно-компрессорных труб с проходным диаметром 50 мм, имеющих композитное теплоизолирующее покрытие на основе коротких базальтовых волокон и намотанного стеклопластика с внешним диаметром 114 мм и погонной массой 11...12 кг/м.

Изготовлены опытные образцы НКТ с укороченной регулярной частью и теплоизоляционным композитным покрытием, которые прошли стендовые тепловые и прочностные испытания на сертифицированном оборудовании. В результате этих испытаний были получены значение температуры (63 ± 3) °С на внешней поверхности покрытия и более чем двойной запас прочности стеклопластиковой оболочки на растяжение и кручение. Показано, что теплоизоляция из коротких базальтовых супертонких волокон, выполненная методом жидкостной фильтрации, имеет низкий коэффициент теплопроводности.

Таким образом, полнотражные насосно-компрессорные трубы с композитным покрытием могут найти применение для закачки перегретого до температуры 420 °С пара под давлением до 35 МПа в нефтяной пласт глубиной до 3000 м.

Работа выполнена в НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана по договору с ЗАО «Компомаш-ТЭК» (генеральный директор В.А. Моисеев) по теме: «Теоретические и экспериментальные исследования создания новейшей конструкции насосно-компрессорных труб (НКТ) с теплоизоляционным покрытием на основе коротких базальтовых и

непрерывных стеклянных волокон, с учетом упрочнения композитной конструкции наружного слоя покрытия для восприятия силового воздействия при монтаже и опускании НКТ в скважины» (шифр заявки «2014-14-579-0004-049»).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сучков Б.М. *Температурные режимы работающих скважин и тепловые методы добычи нефти*. Ижевск, Институт компьютерных исследований, 2007, 408 с.
- [2] Кудинов В.И. *Основы нефтегазопромыслового дела*. Москва—Ижевск, Институт компьютерных исследований, 2004, 720 с.
- [3] Моисеев В.А., Андриенко В.Г., Фролов В.И., Клокотов Ю.Н. Теплоизоляция нефтепромысловых паропроводов для транспортировки пара с закритическими параметрами. *Нефтяное хозяйство*, 2012, № 1, с. 92–94.
- [4] Моисеев В.А., Моисеев А.В., Фролов В.И., Комков М.А., Зелинский Р.В. Термобарьерное покрытие для термоизолированных НКТ нового поколения. *Биржа интеллектуальной собственности*, 2013, т. XII, № 11, с. 17–20.
- [5] 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. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2014-2-1203>
- [6] 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. Электрон. журн.*, 2015, № 04, с. 13–28. DOI: 10.7463/0315.0761820
- [7] Комков М.А., Моисеев В.А., Тарасов В.А., Тимофеев М.П. Уменьшение негативного влияния на биосферу добычи 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.
- [8] 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, вып. 1 (61). <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-1-1575>
- [9] Гофин М.Я. *Жаростойкие и теплозащитные конструкции многоразовых аэрокосмических аппаратов*. Москва, ЗАО ТФ Мир, 2003, 671 с.
- [10] Комков М.А., Болотин Ю.З., Васильева Т.В., Зарубина О.В. Разработка и экспериментальные исследования теплоизолирующих покрытий насосно-компрессорных труб на основе базальтовых и стеклянных волокон. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-7-1903>
- [11] 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

Статья поступила в редакцию 12.10.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Комков М.А., Тарасов В.А. Опыт создания насосно-компрессорных труб для нефтедобычи с теплоизоляцией на основе базальтовых и стеклянных волокон.

Инженерный журнал: наука и инновации, 2022, вып. 10.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-10-2222>

Комков Михаил Андреевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

e-mail: m_komkov@list.ru

Тарасов Владимир Алексеевич — д-р техн. наук, профессор, кафедра «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор более 200 научных работ в области технологии машиностроения, контроля и диагностики.

e-mail: tarasov_va@mail.ru

Experience in creating the oil production tubing with thermal insulation based on basalt and glass fibers

© M.A. Komkov, V.A. Tarasov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The paper presents results of design, development, manufacturing technologies, and experimental studies of prototypes of the multilayer tubing with thermal insulation from short basalt fibers and an outer shell of wound glass fiber. New multilayer tube was designed with hardening of the composite outer layer in the section exposed to hydraulic tongs impact during installation and tubes' lowering into the oil wells. It was demonstrated that high-temperature and low-density thermal insulation of the tubes could be provided with the short basalt superthin fibers by grinding and cleaning them from impurities using the liquid method. Thermal and strength tests of the tube samples with the shortened regular part were made on the certified equipment and showed permissible temperature on the coating outer surface with more than twice higher safety margin of the fiberglass shell regarding tension and torsion.

Keywords: oil production, tubing, thermal insulation, short basalt fibers, thermal conductivity coefficient, fiberglass shell, thermal and strength tests

The work was carried out at the Special Engineering Scientific Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University under an agreement with the CJSC Compomash-TEK (V.A. Moiseev, General Director) on the topic: "Theoretical and experimental studies of creating the advanced design of tubing with a heat-insulating coating based on short basalt and continuous glass fibers taking into account the strengthening composite structure of the coating outer layer for perception of force during the tubing installation and lowering into the wells" (Application Code "2014-14-579-0004-049").

REFERENCES

- [1] Suchkov B.M. *Temperaturnye rezhimy rabotayuschikh skvazhin i teplovyie metody dobychi nefi* [Temperature regimes of the operating wells and thermal methods in oil production]. Izhevsk, Institut kompiuternykh issledovaniy, 2007, 408 p.
- [2] Kudinov V.I. *Osnovy neftegazopromyslovogo dela* [Fundamentals of the oil and gas industry]. Moscow—Izhevsk, Institut kompiuternykh issledovaniy, 2004, 720 p.
- [3] Moiseev V.A., Andrienko V.G., Frolov V.I., Klokov Yu.N. Teploizolyatsiya neftepromyslovykh paroprovodov dlya transportirovki para s zakriticheskimi parametrami [Thermal insulation of the oilfield steam pipelines for transporting steam with supercritical parameters]. *Neftyanoe khozyaistvo — Oil Industry*, 2012, no. 1, pp. 92–94.
- [4] Moiseev V.A., Moiseev A.V., Frolov V.I., Komkov M.A., Zelinsky R.V. Termobaryerное pokrytie dlya termoisolirovannykh NKT novogo pokoleniya [Thermal barrier coating for thermally insulated tubing of new generation]. *Birzha intellektualnoy sobstvennosti — Intellectual Property Exchange*, 2013, vol. XII, no. 11, pp. 17–20.
- [5] Komkov M.A., Badanina Yu.V., Timofeev M.P. Razrabotka i issledovanie termostoykikh pokrytiy truboprovodov iz korotkikh bazaltovykh volokon [Development and research of heat-resistant pipeline coatings of short basalt fibers].

- Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2014, iss. 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2014-2-1203>
- [6] Badanina Yu.V., Komkov M.A., Tarasov V.A., Timofeev M.P., Moiseev A.V. Modelirovanie i eksperimentalnoye opredelenie tekhnologicheskikh parametrov zhidkostnogo formirovaniya bazaltovoy teploizolyatsii nasosno-kompressornykh trub [Simulation and experimental determination of technological parameters of the liquid molding of the tubing basalt thermal insulation]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana. Elektron. Zhurnal — Science and education. BMSTU Electronic journal*, 2015, no. 04, pp. 13–28. <https://doi.org/10.7463/0315.0761820>
- [7] Komkov M.A., Moiseev V.A., Tarasov V.A., Timofeev M.P. Umenshenie negativnogo vliyaniya na biosferu dobychi tyazhelyy nefti i ekologicheskii chistaya tekhnologiya zakachki para sverkhkriticheskikh parametrov v neftyanye plasty za schet sozdaniya novykh nasosno-kompressornykh trub s ekologicheskii chistym teplozaschitnym pokrytiem [Reducing negative impact on the heavy oil production biosphere and environmentally friendly technology for pumping supercritical steam into the oil reservoirs by creating new tubing with environmentally friendly heat-protection coating]. *Geofizicheskie protsessy i biosfera — Geophysical processes and biosphere*, 2015, vol. 14, no. 1, pp. 70–79.
- [8] Komkov M.A., Badanina Yu.V., Tarasov V.A., Filimonov A.S. Analiz strukturnykh i teplofizicheskikh kharakteristik vysokoporistoy bazaltovoy teploizolyatsii nasosno-kompressornykh trub [Analysis of structural and thermophysical characteristics of the highly porous basalt thermal insulation for tubing]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, iss. 1 (61). <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-1-1575>
- [9] Gofin M.Ya. *Zharostoykie i teplozaschitnye konstruksii mnogorazovykh aerokosmicheskikh apparatov* [Heat-resistant and heat-shielding structures of reusable aerospace vehicles]. Moscow, CJSC TF Mir, 2003, 671 p.
- [10] Komkov M.A., Bolotin Yu.Z., Vasileva T.V., Zarubina O.V. Razrabotka i eksperimentalnye issledovaniya teploizoliruyuschikh pokrytyy nasosno-kompressornykh trub na osnove bazaltovykh i steklyannykh volokon [Development and experimental studies of heat-insulating coatings for tubing based on basalt and glass fibers]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-7-1903>
- [11] Komkov M.A., Timofeev M.P., Larionova A.V. Otsenka ekspluatatsionnykh kharakteristik korotkovoloknistoy bazaltovoy teploizolyatsii pri kriogennykh temperaturakh [Evaluation of performance characteristics of the short-fiber basalt thermal insulation at cryogenic temperatures]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 7, pp. 59–68. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-7-59-68>

Komkov M.A., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Rocket and Space Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: m_komkov@list.ru

Tarasov V.A., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Rocket and Space Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University; author of more than 200 scientific papers in the field of engineering technology, control and diagnostics. e-mail: tarasov_va@mail.ru