

Анализ структурных и теплофизических характеристик высокопористой базальтовой теплоизоляции насосно-компрессорных труб

© М.А. Комков, Ю.В. Баданина, В.А. Тарасов, А.С. Филимонов

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

Показана актуальность создания высокопористой, низкоплотной и экологически чистой теплоизоляции из доступных и дешевых базальтовых волокон и минеральной связки для работы конструкций при температуре до 750 °С. Рассмотрено базальтовое теплоизоляционное покрытие насосно-компрессорных труб (НКТ), полученное методом фильтрационного осаждения коротких волокон из пульпы на перфорированную оснастку. Проведен анализ количественного учета передачи теплового потока в межтрубном пространстве через высокопористую теплоизоляцию НКТ вследствие теплопроводности каркаса из базальтовых волокон, сухого воздуха и путем лучистого переноса теплоты. Показано, что при определении коэффициента теплопроводности волокнистого материала с высокой пористостью необходимо учитывать решающий вклад в теплопередачу лучистого теплопереноса.

Ключевые слова: теплоизоляция конструкций, короткие базальтовые волокна, пористость теплоизоляционного материала, коэффициент теплопроводности, насосно-компрессорные трубы, цилиндрические скорлупы

Введение. Важным направлением развития машиностроения является повышение экономической эффективности теплоизоляционных материалов и конструкций, неразрывно связанное с разработкой новых технологий. Очень часто оригинальные разработки, выполненные для изделий ракетно-космической техники, в дальнейшем используются в других отраслях промышленности, и наоборот. Так, созданный из кварцевых волокон теплозащитный материал ТЗМК-10 [1] для изготовления теплозащитных плиток воздушно-космического самолета «Буран» может применяться для других нужд при температуре до 1250 °С, однако стоимость производства этого материала достаточно высока.

В связи с этим актуальной задачей является создание высокопористой и экологически чистой теплоизоляции с низким коэффициентом теплопроводности на основе коротких базальтовых волокон и минеральной связки. Такая теплоизоляция может быть использована как при проектировании новых систем космических летательных аппаратов и орбитальных станций, так и при изготовлении насосно-компрессорных труб (НКТ) для добычи нефти, а также в других отраслях хозяйства.

Большая часть запасов нефти на территории Российской Федерации (более 70 %) [2–5] — это тяжелая, трудно извлекаемая нефть по-

вышенной вязкости и плотности, 80 % которой залегают на глубине 2...3 км. Для добычи такой нефти используют термические методы разогрева пластов перегретым паром с высокими начальными параметрами (температура 420...450 °С, давление 35 МПа и более [6–8]) и перехода к нефтеносному пласту при температуре пара 350...400 °С. Очевидно, что для подачи теплоносителя в пласт необходимо создать эффективную теплоизоляцию НКТ, такую, чтобы температура наружной поверхности теплоизоляционного покрытия (ТИП) в регулярной части трубы не превышала 60...65 °С, а масса 1 м погонной длины теплоизолированной НКТ диаметром 60×5 мм составляла не более 10...12 кг. Применение в настоящее время двухслойных вакуумно-теплоизолированных НКТ («термокейсов») для закачки в пласт перегретого пара ограничено низким рабочим давлением, относительно невысокой температурой и значительной массой труб на 1 м погонной длины, что не позволяет применять их в скважинах глубиной более 1,5 км.

В статьях [9–11] рассмотрены возможности использования высокопористой теплоизоляции НКТ на основе коротких базальтовых волокон [12–13] с минеральной связкой из оксида алюминия и внешней защитно-силовой стеклопластиковой оболочкой. Снижение кондуктивного переноса теплоты в коротковолокнистой базальтовой теплоизоляции НКТ достигается благодаря ее высокой пористости (94...96 %). Требуемая пористость, плотность и прочность теплоизоляционного материала на сжатие обеспечиваются технологией фильтрационного осаждения [11, 14] коротких базальтовых волокон со связкой из глинозема на перфорированную оснастку и последующего формирования из них ТИП в виде полуцилиндров или скорлуп.

Целью исследования было определение коэффициента теплопроводности материала из коротких базальтовых волокон с учетом лучистого переноса теплоты, обеспечивающего максимально возможное уменьшение массы ТИП регулярной части НКТ, работоспособной при температуре до 420 °С.

Материалы и эксперименты. В качестве исходного материала для изготовления ТИП было выбрано базальтовое супертонкое волокно MINOL [13] диаметром $d_b = 0,5...3,0$ мкм (исходная длина штапельных волокон $l_b = 50...60$ мм) с малым содержанием неволоконистых включений в холсте (около 8 %). Применение этого материала в ТИП привлекательно низкой теплопроводностью отдельно взятых волокон, высокой адгезией к минеральной связке в узлах пересечения волокон в формируемом материале и сравнительно низкой себестоимостью по сравнению с себестоимостью, например, с кварцевых волокон.

Диаметр и длина волокон. При выборе класса базальтовых волокон для изготовления ТИП исходят из того, что минимальной теплопроводностью обладают элементарные волокна из базальта (рис. 1) диаметром 3 мкм и менее. Кроме того, при малых диаметрах увеличивается тепловое сопротивление материала вследствие увеличения удельной поверхности волокон.

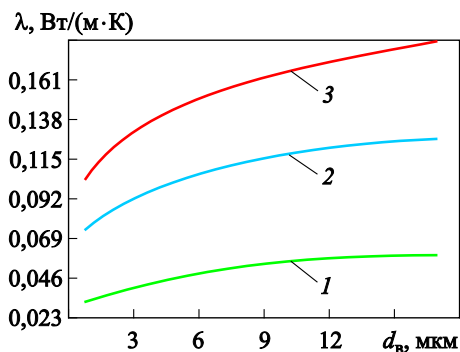


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплопроводности базальтовых волокон от их диаметра при различных температурах: 1 — $T_{cp} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 — $300\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 — $500\text{ }^{\circ}\text{C}$

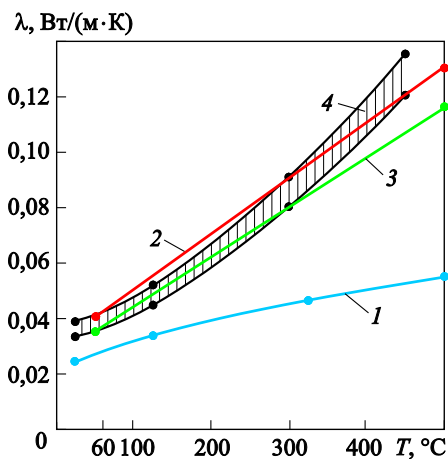


Рис. 2. Зависимость от температуры коэффициента теплопроводности сухого воздуха (1), базальтовых волокон диаметром 3 мкм (2); 1,5 мкм (3) и базальтовой теплоизоляции плотностью $95\text{...}125\text{ кг/м}^3$ в виде прошитого рулонного материала из исходных штапельных волокон

В настоящее время из исходных базальтовых супертонких волокон длиной 50...60 мм воздушным методом получают высокопористый огнезащитный рулонный прошивной материал [15] плотностью $95\text{...}125\text{ кг/м}^3$ или прошивной мат [16] плотностью $25\text{...}60\text{ кг/м}^3$ и пористостью 95...98 %, имеющие сравнительно высокие коэффициенты теплопроводности (рис. 2, [15]). Это объясняется тем, что при изготовлении рулонного материала или мата структура получается неоднородной, содержит неволоконистые включения, а при наличии высокой пористости в области температур около $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ становится заметным лучистый перенос теплоты.

Для получения равномерной и высокопористой структуры базальтовой теплоизоляции необходимо исходные базальтовые супертонкие волокна длиной 50...60 мм измельчить до 1,0...1,5 мм. Процесс дезинтеграции базальтовых штапельных волокон производится в пропеллерной мешалке в жидкой (водной) среде (рис. 3) при кон-

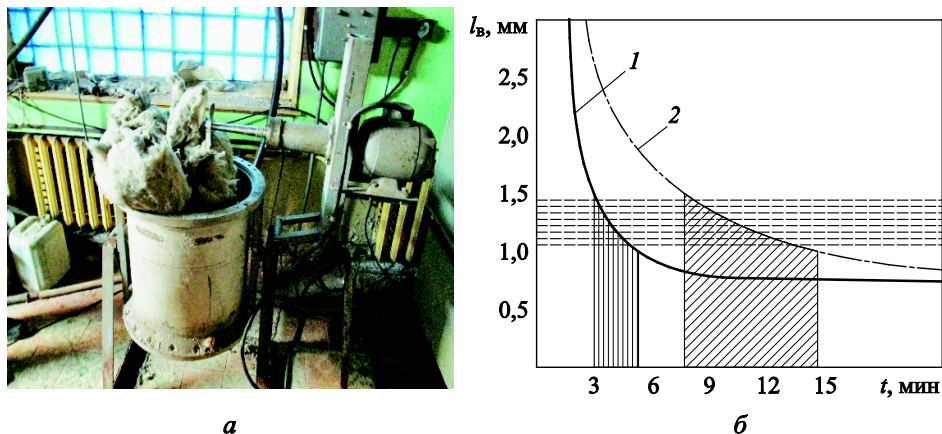


Рис. 3. Исходные базальтовые волокна и камера дезинтегратора (а); зависимость длины l_b волокна от времени t дезинтеграции исходных волокон (б):
1 — кварцевое волокно; 2 — базальтовое волокно

центрации исходных волокон 15...20 г/л и скорости вращения механической мешалки 1200...1500 об/мин, время дезинтеграции волокон составляет 8...15 мин.

В результате дезинтеграции получают чистые короткие волокна (рис. 4, а), а неволокнистые включения в виде флоккул, корольков и другого мусора (рис. 4, б) отделяются от коротких базальтовых волокон, осаждаются на дно камеры и легко удаляются.

Метод изготовления волокнистого теплоизоляционного материала определяет его структуру и, следовательно, его механические и теплофизические свойства. Так, применение метода фильтрацион-

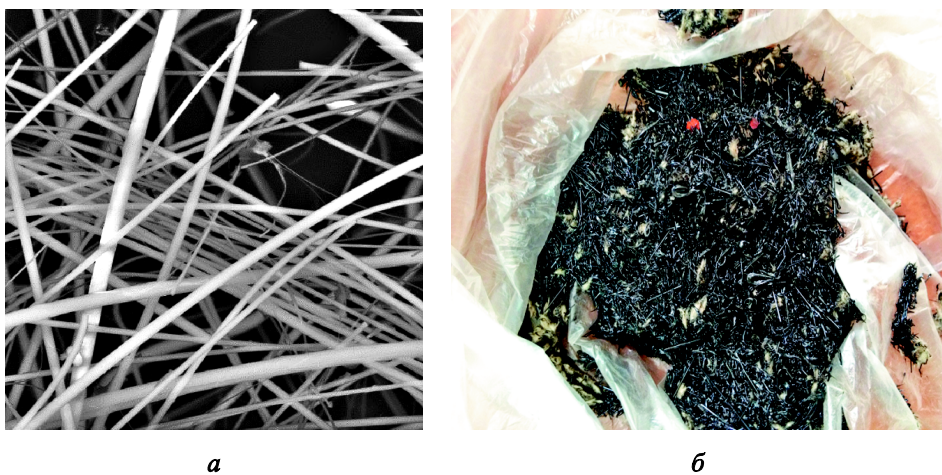


Рис. 4. Измельченные и очищенные базальтовые волокна (а) и неволокнистые включения в виде мусора (б)

ного осаждения базальтовых волокон с минеральной связкой из жидкой пульпы при изготовлении теплоизоляционных изделий обеспечивает получение однородной структуры материала по всему объему [8–10] благодаря равномерному осаждению коротких волокон на перфорированную оснастку. Теплоизоляционное покрытие НКТ в виде полуцилиндров или скорлуп формируют в пресс-форме специальной конструкции фильтрацией пульпы и одновременным вакуумированием камеры фильтра с подпрессовкой слоя осадка в заданные размеры изделия.

В качестве минеральной связки базальтовой теплоизоляции выбран оксид алюминия Al_2O_3 (массовая доля 5...7 %). Назначение связки — скрепление отдельных волокон в местах их соприкосновения для придания изделию прочности и упругости. В качестве связующего, растворенного в пульпе, используют гидроксид алюминия, получаемый из соли сернокислого алюминия при осаждении ее раствором аммиака в водной среде. Полученный гидроксид представляет собой объемистый студенистый осадок белого цвета, практически не растворимый в воде. Оксид алюминия образуется в процессе сушки и термообработки изделия при температуре 300 °С.

Изготовленное ТИП НКТ диаметром $d_{тр} = 60 + 0,3$ мм и толщиной $h_{тип} = 25 \pm 0,2$ мм в виде цилиндрических скорлуп показано на рис. 5. Средняя плотность ТИП составила $\rho_{тип} = 156 \pm 3,4$ кг/м³, пористость волокнистой композиции $m = 1 - \rho_{тип} / \rho_{б.в}$ была равна 94,3 %, где $\rho_{б.в} = 2750$ кг/м³ — плотность волокон из базальта.



а



б

Рис. 5. Общий вид готовых цилиндрических скорлуп (а) и установленных на трубу (б)

Лабораторные тепловые испытания НКТ с ТИП на основе коротких базальтовых волокон проводились на тепловом стенде [10], разработанном СибГАУ им. акад. М.Ф. Решетнева. Результаты испытаний показаны на рис. 6.

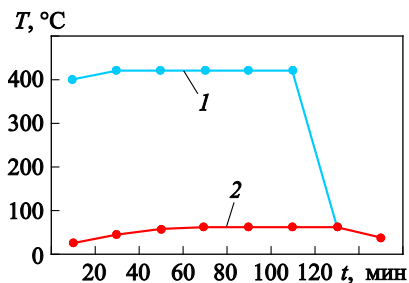


Рис. 6. Изменение температуры НКТ и поверхности ТИП: 1 — температура горячего воздуха на входе в НКТ; 2 — температура датчика на поверхности ТИП

внутренней стенке НКТ, $T_1 = 420$ °C; T_2 — температура на наружной стороне покрытия НКТ, $T_2 = 63$ °C; $h_{\text{тип}}$ — толщина теплоизоляции НКТ, $h_{\text{тип}} = 25$ мм.

Из формулы (1) находим $\lambda_{\text{тип}} = 0,0413$ Вт/(м·К), что почти вдвое меньше, чем значение коэффициента теплопроводности рулонного материала и прошивных матов из базальтового супертонкого волокна (см. рис. 2).

Таким образом, разработка легковесных, экологически чистых, пожаробезопасных и дешевых теплоизоляционных изделий на основе коротких базальтовых волокон и минеральной связки, перерабатываемых в теплоизоляционные конструкции в виде пластин, плиток, цилиндров, полуцилиндров, конусов, полусфер и профильных изделий методом жидкостной фильтрации волокон из пульпы, является важным и актуальным направлением исследований.

Обсуждение результатов. Для определения требуемой толщины ТИП НКТ необходимо найти осредненный коэффициент теплопроводности ТИМ в зависимости от его плотности или пористости волокнистой структуры. При количественном учете теплообмена в межтрубном пространстве будем считать, что тепловой поток от горячей стенки НКТ к более холодной внешней защитной оболочке будет передаваться вследствие теплопроводности каркаса из базальтовых волокон, сухого воздуха и путем лучистого переноса теплоты. Очевидно, что при таком подходе коэффициент теплопроводности является обобщенной характеристикой проводимости теплоты в материале — эффективной теплопроводностью. В этом случае суммарный, или эффективный, коэффициент теплопроводности представим как сумму трех составляющих:

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_{\text{б.в}} + \lambda_{\text{возд}} + \lambda_{\text{рад}} = \lambda_{\text{конд}} + \lambda_{\text{рад}}, \quad (2)$$

При удельном тепловом потоке $q_1 = 154$ Вт/м [9] для известных значений параметров изделия коэффициент теплопроводности цилиндрических скорлуп из коротких базальтовых волокон можно определить из формулы

$$q = \frac{q_1}{\pi d_{\text{тр}}} = \frac{2}{d_{\text{тр}}} \frac{\lambda_{\text{тип}}(T_1 - T_2)}{\ln(1 + 2h_{\text{тип}} / d_{\text{тр}})}, \quad (1)$$

где $d_{\text{тр}}$ — наружный диаметр НКТ, $d_{\text{тр}} = 60$ мм; T_1 — температура на

где $\lambda_{\text{б.в}}$, $\lambda_{\text{возд}}$, $\lambda_{\text{рад}}$ и $\lambda_{\text{конд}}$ — соответственно коэффициенты теплопроводности каркаса из базальтовых волокон, сухого воздуха, коэффициенты радиационной и кондуктивной теплопроводности, $\lambda_{\text{конд}} = \lambda_{\text{б.в}} + \lambda_{\text{возд}}$.

Анализ экспериментальных данных, полученных для коэффициентов теплопроводности базальтовых волокон диаметром 1,5...3,0 мкм в зависимости от температуры (см. рис. 2), показывает, что они могут быть усреднены и аппроксимированы линейной зависимостью вида

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

где T — текущая температура; $\lambda_{0\text{б}}$ — коэффициент теплопроводности тонких волокон из базальта при температуре $T_0 = 20$ °С, $\lambda_{0\text{б}} = 0,032$ Вт/(м·К); $a = 1/170$ К — коэффициент аппроксимации.

Для спокойного воздуха экспериментальные значения (см. рис. 2) также можно выразить линейной зависимостью

$$\lambda_{\text{возд}}(T) = \lambda_{0\text{в}} [1 + b(T - T_0)], \quad (4)$$

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

Без учета тепловых потерь на излучение Стефана — Больцмана и спокойного состояния воздуха в порах теплоизоляционного материала коэффициент кондуктивной теплопроводности может быть найден на основании правила смесей:

$$\lambda(m, T) = \lambda_{\text{конд}} = m \lambda_{\text{возд}}^{\text{ср}} + (1 - m) \lambda_{\text{б.в}}^{\text{ср}}, \quad (5)$$

где m — пористость волокнистой теплоизоляции, $m = 1 - \rho_{\text{тим}} / \rho_{\text{б.в}}$ ($\rho_{\text{тим}}$ — плотность теплоизоляционного материала; $\rho_{\text{б.в}}$ — плотность базальтовых волокон, $\rho_{\text{б.в}} = 2750$ кг/м³). Средние значения коэффициентов $\lambda_{\text{возд}}^{\text{ср}} = 0,0406$ Вт/(м·К) и $\lambda_{\text{б.в}}^{\text{ср}} = 0,0734$ Вт/(м·К) для интервала температур 60...420 °С определены на основании зависимостей (3) и (4). На рис. 7, согласно выражению (5) и средним значениям коэффициентов для волокон и воздуха, показано изменение коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{конд}}$ в зависимости от пористости и плотности ТИП.

Ориентация волокон в плоскостях, перпендикулярных тепловому потоку, существенно повышает термическое сопротивление материала лучистому переносу теплоты. Однако при высокой пористости теплоизоляционного материала из коротких базальтовых волокон лу-

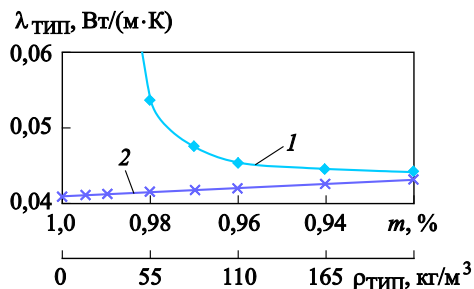


Рис. 7. Зависимости коэффициентов эффективной теплопроводности (1) ТИП НКТ из коротких базальтовых волокон с учетом лучистого переноса теплоты и кондуктивной теплопроводности (2) покрытия НКТ, определенной без учета потерь на лучистый перенос теплоты

чистая составляющая в переносе теплоты от стенки НКТ к защитной оболочке может иметь определяющее значение. Коэффициент лучистой теплопроводности для волокнистых материалов $\lambda_{\text{рад}}$ можно найти по следующей зависимости [17], опубликованной научно-исследовательским центром ОАО «Теплопроект»:

$$\lambda_{\text{рад}} = \frac{\sigma_0 T_m^3}{K_{\text{осл}}} \frac{\pi d_{\text{в}}}{(1-m)}, \quad (6)$$

где σ_0 — константа Больцмана, равная $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м·К); T_m — средняя температура изоляции, К; m — пористость; $d_{\text{в}}$ — диаметр волокна, м; $K_{\text{осл}}$ — коэффициент ослабления (константа, определяемая для различных видов волокон по эмпирическим формулам); для базальтовых волокон

$$K_{\text{осл}} = 70 m d_{\text{в}} T_m + 5 \cdot 10^3 (1-m) / T_m. \quad (7)$$

В зависимостях (6) и (7) средняя температура, диаметр волокна и коэффициент ослабления определяют по формулам

$$T_m = \sqrt[3]{(T_1^3 + T_2^3) / 2}; \quad d_{\text{в}} = \sum_{i=1}^n d_i(n_i); \quad K_{\text{осл}} = \sum_{i=1}^n K_i(d_i, n_i), \quad (8)$$

где T_1 — температура теплоизоляционного покрытия НКТ, $T_1 = 333$ К; T_2 — температура стальной стенки НКТ, $T_2 = 693$ К; T_m — среднее расчетное значение, $T_m = 570$ К; n_i — относительное число волокон диаметром d_i .

Обработка нескольких электронных фотографий позволила получить следующее распределение по усредненным диаметрам базальтовых волокон (см. рис. 2): $d_i = 3$ мкм — 23 %, 2 мкм — 46 %, 1 мкм — 31 %.

Результаты расчета коэффициента радиационной теплопроводности $\lambda_{\text{рад}}$, согласно выражениям (6)–(8) для среднего диаметра волокна $d_{\text{в}} = 1,92$ мкм, в сумме с коэффициентом кондуктивной теплопроводности $\lambda_{\text{конд}}$ (5) определяющие значение эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{эф}}$ (2) ТИП НКТ, показаны на рис. 7. Изменение значения суммарного коэффициента теплопроводности изоляции из коротких базальтовых волокон показывает, что радиационная составляющая оказывает существенное влияние лишь при малой плотности материала и пористости m свыше 96 %.

Ориентируясь на характеристики вакуумно-изолированных НКТ [3] («термокейсов»), для которых допустимой считается потеря теплового потока по длине трубы $q_1 = 150$ Вт/м, на основании формулы (1) определим необходимую толщину ТИП НКТ из коротких базальтовых волокон $h_{\text{тип}}$ без учета ($\lambda_{\text{тип}} = h_{\text{конд}}$) и с учетом ($\lambda_{\text{тип}} = h_{\text{рад}}$) лучистого переноса теплоты в высокопористом теплоизоляционном материале:

$$h_{\text{тип}} = \frac{d_{\text{тр}}}{2} \left[\exp \left(2\pi \frac{\lambda_{\text{тип}} \Delta T}{q_1} \right) - 1 \right], \quad (9)$$

где $\Delta T = (T_1 - T_2) = 360$ °С — перепад температуры на внешней и внутренней стенках теплоизоляции.

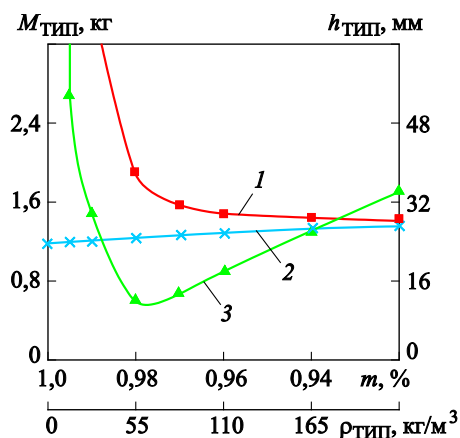


Рис. 8. Зависимости толщины слоя (1) и массы 1 м (3) ТИП НКТ из коротких базальтовых волокон с учетом лучистого переноса теплоты, а также толщины (2) покрытия НКТ, определенной без учета потерь на лучистый перенос теплоты ($M_{\text{тип}}$ — масса 1 м погонной длины ТИП)

Результаты расчета толщины слоев ТИП НКТ по формуле (9) и значения эффективной массы $M_{\text{эф}}$ 1 м теплоизоляции трубы приведены на рис. 8.

Выводы

1. Показано, что теплоизоляционный материал, изготовленный из измельченных и очищенных базальтовых волокон, имеет при температуре 60...420 °С в 1,8 раза меньшее значение коэффициента теплопроводности по сравнению с аналогичным показателем для прошивных рулонов и матов из исходных супертонких базальтовых волокон.

2. Установлено, что при увеличении пористости базальтовой теплоизоляции свыше 96...97 % многократно возрастает эффективный коэффициент теплопроводности материала в интервале температур 60...420 °С вследствие лучистого переноса теплоты, приводящего к резкому увеличению толщины теплоизоляционного покрытия конструкции.

Статья отражает результаты работы, проведенной в рамках Соглашения о предоставлении субсидии № 14.579.21.0024 от 5 июня 2014 г. (Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) REMEF157914X0024) при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лозино-Лозинский Г.Е., Братухин А.Г., ред. *Авиационно-космические системы*. Москва, Изд-во МАИ, 1997, 416 с.
- [2] Комков М.А., Моисеев В.А., Тарасов В.А., Тимофеев М.П. Уменьшение негативного влияния на биосферу при 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.
- [3] Калинин В. Свита для нефтяных королей. *Сибирская нефть*, 2012, № 4/91, с. 16–19.
- [4] Сучков Б.М. *Температурные режимы работающих скважин и тепловые методы добычи нефти*. Москва, Ижевск, Изд-во ИКИ, 2007, 406 с.
- [5] Komkov M.A., Moiseev V.A., Tarasov V.A., Timofeev M.P. Minimization of the Negative Influence on the Biosphere in Heavy Oil Extraction and Ecologically Clean Technology for the Injection of the Steam with Supercritical Parameters in Oil Strata on the Basis of New Ecologically Clean Tubing Pipes with Heat Resistant Coatings. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, vol. 51, no. 8, pp. 819–825.
- [6] Моисеев В.А., Моисеев А.В., Комков М.А., Фролов В.И. Высокотемпературный энергосберегающий нефтепромысловый паропровод. *Биржа интеллектуальной собственности*, 2012, т. XI, № 9, с. 57–60.
- [7] Моисеев В.А., Моисеев А.В., Фролов В.И., Комков М.А. *Труба теплоизолированная*. Пат. № 121855 RU, E21B 17/00 U1, 2012, бюл. № 31, 3 с.
- [8] 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.
- [9] Филимонов А.С., Тарасов В.А., Комков М.А., Моисеев В.А., Тимофеев М.П., Герасимов Н.В. Экспериментальный анализ свойств перспективных тепло-

- изоляционных материалов машиностроения, полученных методом фильтрационного осаждения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2012, вып. 9. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/382.html>
- [10] 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>
- [11] Баданина Ю.В., Комков М.А., Тарасов В.А., Тимофеев М.П., Моисеев А.В. Моделирование и экспериментальное определение технологических параметров жидкостного формирования базальтовой теплоизоляции насосно-компрессорных труб. *Наука и образование*, 2015, № 4. DOI: 10.7463/0315.0761820
- [12] Джигрис Д.Д., Волинский А.К., Козловский П.П. и др. Основы технологии получения базальтовых волокон и их свойства. *Базальтовые волокнистые композиционные материалы и конструкции*. Киев, Наукова думка, 1980, 81 с.
- [13] *Базальтовое супертонкое волокно MINOL*. URL: <http://uteplitel-minol.ru/holst/> (дата обращения 05.09.2016).
- [14] 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.
- [15] *Материал прошивной базальтовый огнезащитный рулонный (МПБОР) по ТУ 5769-004-02500345-2009*. URL: <http://www.bztm.su/vbor.php> (дата обращения 05.09.2016).
- [16] *Маты прошивные из базальтового супертонкого волокна (МПБСТВ) по ТУ 5762-002-47897055-2003*. URL: <http://www.bztm.su/bstv.php> (дата обращения 05.09.2016).
- [17] *Методика оценки влияния влажности на эффективность теплоизоляции оборудования и трубопроводов. МДС 41-7.2004*. URL: <http://www.gosthelp.ru/text/MDS4172004Metodikaocenkiv.html>

Статья поступила в редакцию 14.10.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

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.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-01-1575>

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

Баданина Юлия Владимировна — аспирантка кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор четырех научных публикаций в области космического машиностроения. e-mail: julia555-90@yandex.ru

Тарасов Владимир Алексеевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «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

Филимонов Алексей Сергеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана, заместитель декана факультета «Специальное машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных работ в области технологии машиностроения, контроля и диагностики. e-mail: alexf72@mail.ru

Analysis of structural and thermal-physical characteristics of high-porosity basalt thermal insulation for tubing

© M.A. Komkov, Yu.V. Badanina, V.A. Tarasov, A.S. Filimonov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The study shows the importance of developing high-porosity, low-density environmentally friendly thermal insulation using accessible and inexpensive basalt fibres and a mineral matrix to create structures operational under temperatures up to 750 °C. We discuss basalt thermal insulation coating for tubing obtained via the technique of depositing short fibres from the pulp upon a perforated attachment by means of filtration. We analysed a quantitative account of heat flow in oil well annuli through high-porosity thermal insulation of tubing due to thermal conductivity of the basalt fibre framework, dry air and via radiant heat transfer. We show that when determining the coefficient of thermal conductivity for a fibrous material characterised by high porosity it is necessary to account for the radiant heat transfer contribution to the heat transfer process, the radiant heat transfer being a critical factor.

Keywords: thermal insulation of structures, short basalt fibres, thermal insulation material porosity, coefficient of thermal conductivity, tubing, cylindrical jackets

REFERENCES

- [1] Lozino-Lozinskiy G.E., Bratukhin A.G., ed. *Aviatsionno-kosmicheskie sistemy* [Aerospace systems]. Moscow, MAI Publ., 1997, 416 p.
- [2] Komkov M.A., Moiseev V.A., Tarasov V.A., Timofeev M.P. *Geofizicheskie protsessy i biosfera — Geophysical Processes and Biosphere*, 2015, vol. 14, no. 1, pp. 70–79.
- [3] Kalinin V. *Sibirskaya neft — Siberian Oil*, 2012, no. 4/91, pp. 16–19.
- [4] Suchkov B.M. *Temperaturnye rezhimy rabotayushchikh skvazhin i teplovye metody dobychi nefi* [Temperatures in functioning oil wells and thermal oil recovery methods]. Ser. *Sovremennyye neftegazovyye tekhnologii* [Contemporary oil-and-gas technologies series]. Moscow, Izhevsk, Computer Research Institute Publ., 2007, 406 p.
- [5] Komkov M.A., Moiseev V.A., Tarasov V.A., Timofeev M.P. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii nauk, Fizika atmosfery i okeana — Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, vol. 51, no. 8, pp. 819–825.
- [6] Moiseev V.A., Moiseev A.V., Komkov M.A., Frolov V.I. *Birzha intellektualnoy sobstvennosti — Intellectual Property Exchange*, 2012, vol. 11, no. 9, pp. 57–60.
- [7] Moiseev V.A., Moiseev A.V., Frolov V.I., Komkov M.A. *Truba teplozolirovannaya* [Thermally insulated tube]. Patent 121855 RU, E21B 17/00 U1. Kompomash-TEK JSC (RU). 2012, bulletin no. 31, 3 p.
- [8] Moiseev V.A., Moiseev A.V., Frolov V.I., Komkov M.A., Zelinskiy R.V. *Birzha intellektualnoy sobstvennosti — Intellectual Property Exchange*, 2013, vol. 12, no. 11, pp. 17–20.
- [9] Filimonov A.S., Tarasov V.A., Komkov M.A., Moiseev V.A., Timofeev M.P., Gerasimov N.V. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2012, issue 9. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/382.html>

- [10] Komkov M.A., Badanina Yu.V., Timofeev M.P. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2014, issue 2. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/hidden/1203.htm>
- [11] Badanina Yu.V., Komkov M.A., Tarasov V.A., Timofeev M.P., Moiseev A.V. *Nauka i obrazovanie — Science and Education*, 2015, no. 4. DOI: 10.7463/0315.0761820
- [12] Dzhigris D.D., Volynskiy A.K., Kozlovskiy P.P. et al. Osnovy tekhnologii polucheniya bazaltovykh volokon i ikh svoystva [Foundations of basalt fibre production technology and fibre properties]. *Bazaltovye voloknistye kompozitsionnye materialy i konstruksii* [Fibrous basalt composite materials and structures]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1980, 81 p.
- [13] *Bazaltovoe supertonkoe volokno “MINOL”*. Zavod BSTV “MINOL”: sayt kompanii [Superfine basalt fiber MINOL. SFBF MINOL plant: company website]. Available at: <http://uteplitel-minol.ru/holst/> (accessed 5 September, 2016).
- [14] Tarasov V.A., Smirnov Yu.V., Timofeev M.P., Filimonov A.S. *Polet, Obshcherossiyskiy nauchno-tekhnicheskii zhurnal — Flight, Pan-Russian scientific and technological journal*, 2007, no. 5, pp. 52–55.
- [15] *Material proshivnoy bazaltovyy ognenezashchitnyy rulonnyy (MPBOR) po TU 5769-004-02500345-2009* [Quilted fire-resistant basalt material in rolls according to Technical Specifications 5769-004-02500345-2009]. Available at: <http://www.bztm.su/vbor.php> (accessed 5 September, 2016).
- [16] *Maty proshivnyye iz bazaltovogo supertonkogo volokna (MPBSTV) po TU 5762-002-47897055-2003* [Quilted mats of superfine basalt fibre according to Technical Specifications 5762-002-47897055-2003]. Available at: <http://www.bztm.su/bstv.php> (accessed 5 September, 2016).
- [17] *Metodika otsenki vliyaniya vlazhnosti na effektivnost teploizolyatsii oborudovaniya i truboprovodov* [A method for estimating the effect of humidity on the equipment and tubing thermal insulation efficiency]. MDS [Methodological documentation in construction] 41-7.2004. Moscow, 2004. Available at: <http://www.gosthelp.ru/text/MDS4172004Metodikaocenkiv.html>

Komkov M.A. (b. 1938) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1966. Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 130 scientific publications 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. Post-graduate student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. Author of 4 scientific publications in the field of aerospace engineering. e-mail: julia555-90@yandex.ru

Tarasov V.A. (b. 1946) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1969. Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 200 scientific publications in the field of engineering technology, monitoring and diagnostics.
e-mail: tarasov_va@mail.ru

Filimonov A.S. (b. 1972) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 1996. Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. Deputy Dean, Mechanical Engineering Faculty, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 40 scientific publications in the field of engineering technology, monitoring and diagnostics.
e-mail: alex72@mail.ru