

Разработка и экспериментальные исследования теплоизолирующих покрытий насосно-компрессорных труб на основе базальтовых и стеклянных волокон

© М.А. Комков, Ю.З. Болотин, Т.В. Васильева, О.В. Зарубина

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

Показано, что для существенного уменьшения теплопроводности теплоизоляционного материала из исходных базальтовых штапельных волокон необходимо их измельчение и очистка от примесей жидкостным способом. Установлено, что теплоизолирующее покрытие насосно-компрессорных труб имеет ограничения по толщине стенки изоляции и погонной массе. Представлены результаты исследований высокотемпературной и низкоплотной теплоизоляции из коротких базальтовых волокон и связки из глинозема.

Ключевые слова: теплоизолирующее покрытие, базальтовые супертонкие волокна, теплопроводность, насосно-компрессорная труба

Введение. Одним из эффективных направлений в освоении высоковязких и трудноизвлекаемых запасов нефти на территории Российской Федерации (более 70 %) [1, 2], залегаемых на глубине 2...3 км, является применение технологий паротеплового воздействия на нефтеносные пласты. Разогрев пластов осуществляют путем длительной закачки в устье скважины сухого пара с высокими начальными параметрами (температурой 420...450 °С под давлением 35 МПа и более [3]) с переходом к нефтеносному пласту пара с температурой 350...400 °С.

Разработка теплоизолированных насосно-компрессорных труб (НКТ) ограничена, с одной стороны, максимальным диаметром теплоизоляции, с другой — получением минимальной погонной массы [4, 5]. Плеть из теплоизолированной НКТ должна свободно входить в ствол обсадной трубы. Зазор между регулярной частью НКТ и обсадной трубой составляет не менее 20 мм, а в местах силовых захватов труб гидравлическим ключом и спайдером — не менее 12...15 мм.

В настоящее время для закачки в пласт перегретого пара температурой до 325 °С и давлением 16 МПа применяются двухслойные с экранно-вакуумной теплоизоляцией НКТ, или термокейсы [1], с проходным диаметром 40 мм и 62 мм. Их используют в стволах с внешним диаметром обсадной трубы 168 мм. Однако возможности термокейсов ограничены низким рабочим давлением и относительно невысокой температурой, а также значительной погонной массой, равной 19,6 кг/м при диаметре НКТ 40 мм и 32,3 кг/м при диаметре 62 мм, что ограничивает условия их применения в скважинах глубиной более 1,5 км.

Целью работы является создание новой конструкции многослойных НКТ с теплоизолирующим покрытием (ТИП) на основе базальтовых и стеклянных волокон для закачки пара, перегретого до температуры 420 °С и более, под давлением 35 МПа в нефтяной пласт глубиной до 3000 м.

Материалы и эксперименты. Анализ работ [1, 3] показывает, что ТИП на основе базальтовых супертонких волокон (БСТВ), имеющих низкую теплопроводность λ (рис. 1), при высокой пористости n (малой плотности материала ТИП) перспективны для использования в конструкции НКТ. В качестве исходных волокон для изготовления ТИП трубы НКТ было выбрано БСТВ фирмы MINOL [6, 7] с диаметрами 0,5...3,5 мкм (средним $d_{БВ} = 1,92$ мкм), исходной длиной штапельных волокон $l_{БВ} = 50...60$ мм и малым содержанием неволокнистых включений в холсте ($\approx 8\%$).

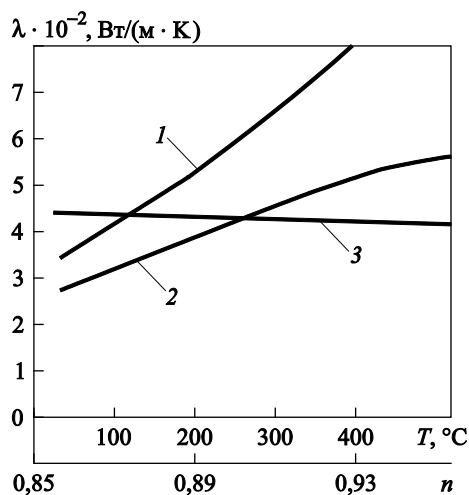


Рис. 1. Температурная зависимость теплопроводности λ супертонких базальтовых волокон (1) и воздуха (2) и зависимость теплопроводности теплоизоляционного материала на их основе (3) от его пористости n

Для проведения теплофизических исследований был разработан теплоизоляционный материал на основе коротких базальтовых волокон ($l_{БВ} = 1,0...1,5$ мм), полученных путем измельчения и очистки от примесей исходных волокон в камере жидкостного дезинтегратора и 5...6 % связки из Al_2O_3 (рис. 2) на основе раствора сернокислого алюминия [8, 9]. Разработанный материал при нагреве в диапазоне температур 60...400 °С (см. рис. 1) имеет низкую теплопроводность,

в среднем равную $0,042 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. При этом плотность такого теплоизоляционного материала при пористости 94 % составляет $156 \text{ кг}/\text{м}^3$, а прочность на сжатие при 20 % упругой деформации — $0,043 \text{ МПа}$.

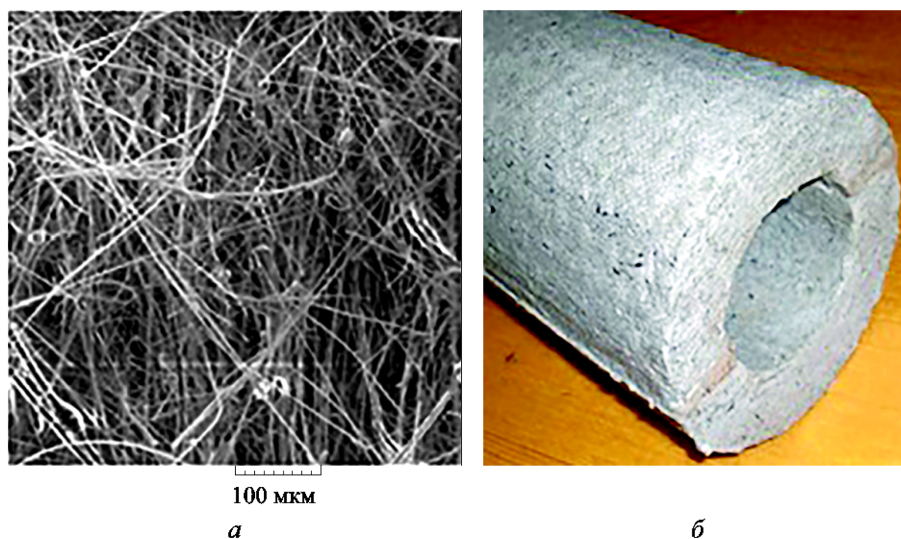


Рис. 2. Микроструктура теплоизоляционного материала из коротких базальтовых волокон со связкой Al_2O_3 (а) и вид собранных теплоизоляционных базальтовых скорлуп для НКТ с диаметром $d_{\text{тр}} = 60 \text{ мм}$ (б)

Обсуждение результатов. Для определения требуемой толщины теплоизоляционного покрытия НКТ необходимо найти осредненную теплопроводность теплоизоляционного материала в зависимости от его плотности или пористости волокнистой структуры [10].

Будем считать, что кондуктивный тепловой поток от горячей стенки НКТ к более холодной внешней защитной стеклопластиковой оболочке будет передаваться за счет теплопроводности сухого воздуха и материала каркаса из базальтовых волокон.

Анализ экспериментальных данных, полученных для коэффициентов теплопроводности базальтовых волокон диаметром $1,0 \dots 3,5 \text{ мкм}$ (см. рис. 1), показывает, что они могут быть усреднены и аппроксимированы линейной зависимостью вида

$$\lambda_{\text{БВ}}(T) = \lambda_{0\text{Б}} [1 + a(T - T_0)], \quad (1)$$

где T — текущая температура материала; $\lambda_{0\text{Б}} = 0,032 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ — теплопроводность материала тонких базальтовых волокон при температуре $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; $a = 1/170 \text{ К}^{-1}$ — коэффициент аппроксимации.

Для спокойного воздуха экспериментальные значения (см. рис. 1) можно также выразить линейной зависимостью:

$$\lambda_{\text{возд}}(T) = \lambda_{0\text{В}} [1 + b(T - T_0)], \quad (2)$$

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

Без учета тепловых потерь на излучение и спокойного состояния воздуха в порах теплоизоляционного материала кондуктивная теплопроводность базальтового ТИП может быть записана на основании правила смесей:

$$\lambda_{\text{ТИП}}^{\text{ср}} = (1 - n)\lambda_{\text{БВ}}^{\text{ср}} + n\lambda_{\text{возд}}^{\text{ср}} = 0,0425 \text{ Вт/(м · К)}, \quad (3)$$

где $n = 1 - \rho_{\text{ТИП}}/\rho_{\text{БВ}}$ — пористость волокнистой теплоизоляции ($\rho_{\text{ТИП}}$ — плотность теплоизоляционного материала; $\rho_{\text{БВ}} = 2750$ кг/м³ — плотность базальтовых волокон).

Средние значения теплопроводности $\lambda_{\text{возд}}^{\text{ср}} = 0,0413$ Вт/(м · К) и $\lambda_{\text{БВ}}^{\text{ср}} = 0,0587$ Вт/(м · К) для интервала температур 60...400 °С определены на основании зависимостей (1) и (2).

Ориентируясь на характеристики вакуумных НКТ [11] (термокейсов), для которых допустимой считается потеря теплового потока по длине трубы $q_1 = 150$ Вт/м, определим с учетом (3) необходимую толщину $h_{\text{ТИП}}$ теплоизоляционного покрытия НКТ из коротких базальтовых волокон без учета лучистого переноса теплоты в высокопористом теплоизоляционном материале по формуле [12]

$$h_{\text{ТИП}} = \frac{d_{\text{тр}}}{2} \left[\exp \left(2\pi \frac{\lambda_{\text{ТИП}}^{\text{ср}} \Delta T}{q_1} \right) - 1 \right] = 24,94 \text{ мм}, \quad (4)$$

где $d_{\text{тр}} = 60$ мм — диаметр стальной НКТ (ГОСТ 633–80) с толщиной стенки 5 мм; $\Delta T = T_1 - T_2 = 340$ °С — перепад температуры на внешней и внутренней стенках теплоизоляции.

При пористости 94 % и плотности базальтовых волокон $\rho_{\text{БВ}} = 2750$ кг/м³ разработанный теплоизоляционный материал имеет плотность $\rho_{\text{ТИП}} = 165$ кг/м³.

Суммарная погонная масса теплоизолированной трехслойной НКТ при учете (4) и толщины стеклопластиковой оболочки, равной 2 мм, равна 9,71 кг/м. Это значение в 2...3 раза меньше погонной массы труб НКТ с вакуумной теплоизоляцией — термокейсами с проходными диаметрами 40 и 62 мм.

Температурные испытания. Были проведены температурные испытания ТИП из коротких БСТВ. Испытанию были подвергнуты

композитные НКТ с укороченной регулярной частью трубы. Схема сборки теплоизоляции НКТ из базальтовых скорлуп и общий вид НКТ с намотанной стеклопластиковой оболочкой приведены на рис. 3.



а



б

Рис. 3. Сборка теплоизолирующих скорлуп с металлической частью НКТ (а) и общий вид двух стыкуемых теплоизолированных НКТ длиной по 2,5 м (б)

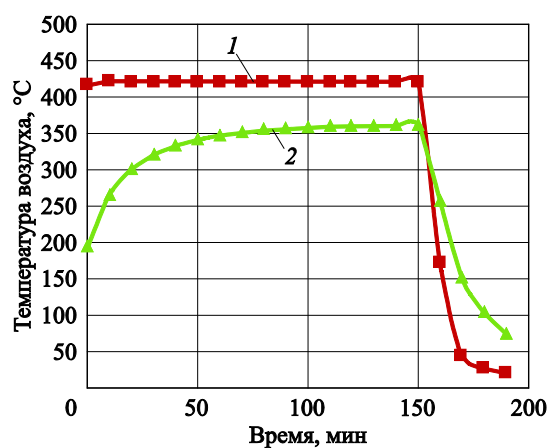


Рис. 4. Изменение во времени температуры воздуха:
1 — на входе в первую трубу; 2 — на выходе из второй трубы

Результаты температурных испытаний двух собранных композитных НКТ на тепловом стенде с максимальным нагревом воздушного потока от тепловентилятора LEISTER до 600 °С представлены на рис. 4. На поверхности стеклопластиковой оболочки как в регулярной части трубы (базальтовые скорлупы, датчики № 2 и № 3), так и в области стыка двух труб (базальтовая манжета, датчик № 1) получена температура стеклопластиковой поверхности НКТ, не превышающая требуемое значение 65 °С (рис. 5).

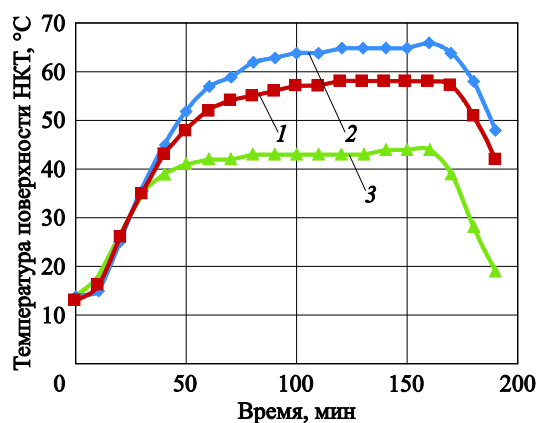


Рис. 5. Изменение во времени показаний датчиков температуры № 1 (1) на стыке труб и № 2, № 3 на регулярной части соответственно первой (2) и второй (3) трубы

Закключение. Проведенные исследования конструкции многослойных НКТ с теплоизолирующим покрытием показали, что экономическая эффективность по критерию «цена — качество» композитных теплоизолированных НКТ нового поколения достигается за счет:

1) применения в качестве теплоизолирующего покрытия НКТ доступных, недорогостоящих и экологически чистых коротких базальтовых супертонких волокон в виде цилиндрических скорлуп и манжет с теплопроводностью в 1,5...2,0 раза меньше, чем у кварцевых, стеклянных или кремнеземных волокон;

2) применения внешней тонкостенной стеклопластиковой защитно-силовой оболочки (изготовленной методом намотки), обеспечивающей высокую прочность на растяжение, низкую стоимость и высокие технико-экономические показатели изделия в целом по сравнению с термокейсами.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сучков Б.М. *Температурные режимы работающих скважин и тепловые методы добычи нефти*. Москва, Ижевск, Изд-во ИКИ, 2007, 406 с.

- [2] Калинин В. Свита для нефтяных королей. *Сибирская нефть*, 2012, № 4/91, с. 16–19.
- [3] 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.
- [4] Моисеев В.А., Моисеев А.В., Комков М.А., Фролов В.И. Высокотемпературный энергосберегающий нефтепромысловый паропровод. *Биржа интеллектуальной собственности*, 2012, т. 11, № 9, с. 57–60.
- [5] Тарасов В.А., Моисеев В.А., Комков М.А., Боярская Р.В., Филимонов А.С. Высокопористая теплозащита на основе базальтового волокна для паронагревательных нефтяных скважин Крайнего Севера. *Химическая физика*, 2016, т. 35, № 7, с. 92–96. DOI: 10.7868/S0207401X1607013X
- [6] *Базальтовое супертонкое волокно MINOL*. URL: <http://uteplitel-minol.ru/products/holst-bstv-minol> (дата обращения 30.01.2019).
- [7] Джигрис Д.Д., Волынский А.К., Козловский П.П., Демьяненко Ю.Н, Махова М.Ф., Лизогуб Г.М. Основы технологии получения базальтовых волокон и их свойства. *Базальто-волоконистые композиционные материалы и конструкции. Сб. науч. тр.* Киев, Наукова думка, 1980, 81 с.
- [8] 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*, 2015, № 4, с. 13–28. DOI: 10/7463/0315.0761820
- [9] Денисов Н.П., Баданина Ю.В. Исследование и подготовка гидромассы для формования из коротких базальтовых волокон теплоизоляционного покрытия насосно-компрессорных труб. *Молодежный научно-технический вестник*, 2015, № 4. URL: <http://ainsnt.ru/doc/777145.html>
- [10] Баданина Ю.В., Комков М.А., Бочкарев С.В., Павловская К.В. Создание насосно-компрессорных труб с высокоэффективным композиционным термобарьерным покрытием для паротепловой обработки скважин. *Фундаментальные исследования*, 2016, № 11 (часть 3), с. 461–466.
- [11] 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 (26). DOI: 10.18698/2308-6033-2014-2-1203
- [12] Баданина Ю.В. Разработка и исследование теплоизолирующих конструкций трубопроводов на основе коротких базальтовых волокон. *Достижения науки и образования*, 2016, № 4 (5), с. 13–17.

Статья поступила в редакцию 21.06.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

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>

Комков Михаил Андреевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 140 научных работ в области технологии машиностроения и композитных конструкций. e-mail: m_komkov@list.ru

Болотин Юрий Зиновьевич — старший преподаватель кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 18 научных работ в области технологии машиностроения и композитных конструкций. e-mail: ub52@mail.ru

Васильева Татьяна Владимировна — ассистент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 10 научных работ в области технологии машиностроения и композитных конструкций. e-mail: vtv64@mail.ru

Зарубина Ольга Васильевна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных работ в области технологии ракетно-космического машиностроения. e-mail: ov_zarubina@mail.ru

Development and experimental studies of heat insulating coatings of basalt and glass-fiber tubing

© M.A. Komkov, Yu.Z. Bolotin, T.V. Vasilieva, O.V. Zarubina

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The study shows that in order to significantly reduce the thermal conductivity coefficient of heat insulating materials made of staple basalt raw fibers, it is necessary to grind and clean them from impurities by liquid method. Within the research, we found that tubing heat insulating coating has the insulation wall thickness and mass per unit length limitations. In this paper we give the results of studying high-temperature and low-density heat insulation of short basalt fibers and alumina bundles.

Keywords: heat insulating coating, basalt super thin fibers, thermal conductivity, tubing

REFERENCES

- [1] Suchkov B.M. *Temperaturnye rezhimy rabotayushchikh skvazhin i teplovyie metody dobychi nefi* [Temperature conditions of flowing wells and thermal methods of oil extraction]. Moscow, Izhevsk, IKI Publ., 2007, 406 p.
- [2] Kalinin V. *Sibirskaya nefi (Siberian oil)*, 2012, no. 4/91, pp. 16–19.
- [3] Komkov M.A., Moiseev V.A., Tarasov V.A., Timofeev M.P. *Geofizicheskie protsessy i biosfera — Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, vol. 14, no. 1, pp. 70–79.
- [4] Moiseev V.A., Moiseev A.V., Komkov M.A., Frolov V.I. *Birzha intellektualnoy sobstvennosti (The house of intellectual property)*, 2012, vol. 11, no. 9, pp. 57–60.
- [5] Tarasov V.A., Moiseev V.A., Komkov M.A., Boyarskaya R.V., Filimonov A.S. *Khimicheskaya fizika — Russian Journal of Physical Chemistry B: Focus on Physics*, 2016, vol. 35, no. 7, pp. 92–96. DOI: 10.7868/S0207401X1607013X
- [6] *Bazaltovoe supertonkoe volokno MINOL* [Basalt superthin fiber MINOL]. Available at: <http://uteplitel-minol.ru/products/holst-bstv-minol> (accessed January 30, 2019).
- [7] Dzhigris D.D., Volynskiy A.K., Kozlovskiy P.P., Demyanenko Yu.N, Makhova M.F., Lizogub G.M. *Osnovy tekhnologii polucheniya bazaltovykh volokon i ikh svoystva* [Fundamentals of basalt fiber production technology and their properties]. *Bazalto-voloknistye kompozitsionnye materialy i konstruksii. Sb. nauch. tr.* [Basalt fiber composite materials and structures. Coll. of sci. papers]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1980, 81 p.
- [8] Badanina Yu.V., Komkov M.A., Tarasov V.A., Timofeev M.P., Moiseev A.V. *Nauka i obrazovanie — Science and Education*, 2015, no. 4, pp. 13–28. DOI: 1/7463/0315.0761820
- [9] Denisov N.P., Badanina Yu.V. *Molodezhny nauchno-tekhnichestkiy vestnik (Youth scientific and technical bulletin)*, 2015, no. 4. Available at: <http://ainsnt.ru/doc/777145.html>
- [10] Badanina Yu.V., Komkov M.A., Bochkarev S.V., Pavlovskaya K.V. *Fundamentalnye issledovaniya — Fundamental Research*, 2016, no. 11 (part 3), pp. 461–466.
- [11] Komkov M.A., Badanina Yu.V., Timofeev M.P. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2014, iss. 2 (26). DOI: 10.18698/2308-6033-2014-2-1203

- [12] Badanina Yu.V. *Dostizheniya nauki i obrazovaniya — Advances in Science and Education*, 2016, no. 4 (5), pp. 13–17.

Komkov M.A. (b. 1938) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School; Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies. Author of over 140 scientific papers in the field of mechanical engineering and composite structures technology. e-mail: m_komkov@list.ru

Bolotin Yu.Z. (b. 1952) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School; Assist. Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies. Author of over 18 scientific papers in the field of mechanical engineering and composite structures technology. e-mail: ub52@mail.ru

Vasilieva T.V. (b. 1964) graduated from Moscow State Aviation Technological University; Assistant, Department of Aerospace Engineering Technologies. Author of over 10 scientific papers in the field of mechanical engineering and composite structures technology. e-mail: vtv64@mail.ru

Zarubina O.V. (b. 1952) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School; Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies. Author of over 40 scientific papers in the field of mechanical engineering and composite structures technology. e-mail: ov_zarubina@mail.ru