электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

УДК 662.998.3:666.189

Исследование и подготовка гидромассы для формования из коротких базальтовых волокон теплоизоляционного покрытия насосно-компрессорных труб

Денисов Н.П., *студент*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Технологии ракетно-космического машиностроения»

Баданина Ю.В., *аспирант*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Технологии ракетно-космического машиностроения»

Научный руководитель: Комков М.А., д.т.н., профессор
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Технологии ракетно-космического машиностроения»
cm12@sm.bmstu.ru

Для извлечения из глубоких скважин тяжелых и вязких нефтей применяется теплосиловое воздействие на нефтяной пласт. Разогрев пласта производится за счет подачи в устье скважины перегретого до 420 °С водяного пара под давлением 35 МПа по теплоизолированной насосно-компрессорной трубе (НКТ) [1-3] в течение длительного времени.

На кафедре «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана (СМ12) в последние несколько лет проводятся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию высокопористой теплоизоляции труб НКТ на основе коротких базальтовых волокон и минеральной связки из оксида Al_2O_3, которая фиксирует базальтовые волокна в местах их контактов. Теплоизоляционное покрытие (ТИП) труб выполнено в виде профилированных базальтовых колец и цилиндрических скорлуп [4]. При этом с наружной стороны на базальтовую теплоизоляцию наматывается защитно-силовая стеклопластиковая оболочка, поверхность которой в приповерхностной зоне скважины не должна нагреваться больше, чем на 60 °С.

В настоящее время для закачки в пласт перегретого пара применяются двухслойные вакуумно-теплоизолированные трубы НКТ или «термокейсы» [5], которые не в полной мере удовлетворяют производственным потребностям нефтяников по длительной надежности вакуумирования межтрубного пространства, излишне большой погонной массе их конструкции и большой стоимости готового изделия. В отличие от

«термокейсов» предлагаемая конструкция НКТ с базальтовой теплоизоляцией имеет малую стоимость, обладает высокой прочностью, имеет существенно меньшую погонную массу и, как следствие, обеспечивает применения таких труб для более глубоких скважин.

Толщина базальтового покрытия труб НКТ $h_{\text{тип}}$ зависит от заданного перепада температур на слое теплоизоляции, коэффициента теплопроводности материала $\lambda_{\text{тим}}$ и предварительно может быть определена из формулы:

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

где q_1 - потеря теплового потока по длине трубы, $q_l = 150$ Вт/м [5]; d – наружный диаметр трубы НКТ, d = 60 мм; $T_1 = 400$ °С - температура стенки стальной трубы; $T_2 = 60$ °С - температура на поверхности базальтового покрытия трубы.

При выборе класса базальтовых волокон для изготовления ТИМ исходят из того, что минимальной теплопроводностью обладают элементарные волокна (рис. 1) с диаметром менее 3 мкм [6]. Кроме того, при малых диаметрах увеличивается тепловое сопротивление материала за счет возрастания удельной поверхности волокон. К данному классу относится базальтовое супертонкое волокно (БСТВ) [7]. Его применение в ТИМ привлекательно по нескольким причинам: низкая теплопроводность волокна; малое содержание не волокнистых включений; высокая адгезия минеральной связки в узлах пересечения волокон в формируемом материале и сравнительно низкая себестоимость по сравнению с кварцевыми волокнами.

Среднее значение коэффициента теплопроводности базальтовой теплоизоляции из волокна БСТВ в интервале температур $\Delta T = T_1 - T_2$ = 340 °С определим из графиков рис. 2 на основании правила смесей:

$$\lambda_{\text{тим}} \cong \lambda_{\text{тим}}^{\text{ср}} = n\,\lambda_{\text{возд}}^{\text{ср}} + (1-n)\lambda_{\text{БВ}}^{\text{ср}}\,, \quad (2)$$

где средние значения коэффициентов базальтового волокна $\lambda_{\text{БВ}}^{\text{ср}}$ = 0,0587 Вт/(м·К) и спокойного воздуха $\lambda_{\text{возд}}^{\text{ср}}$ = 0,0413 Вт/(м·К). Тогда для материала с пористостью n = 0,92…0,94 средний коэффициент теплопроводности ТИМ будет равен $\lambda_{\text{тим}}^{\text{ср}}$ = 0,0425 Вт/(м·К). Подставив $\lambda_{\text{тим}}^{\text{ср}}$ из (2) в формулу (1), определим толщину теплоизоляции для трубы НКТ равную $h_{\text{тим}}$ = 25 мм.

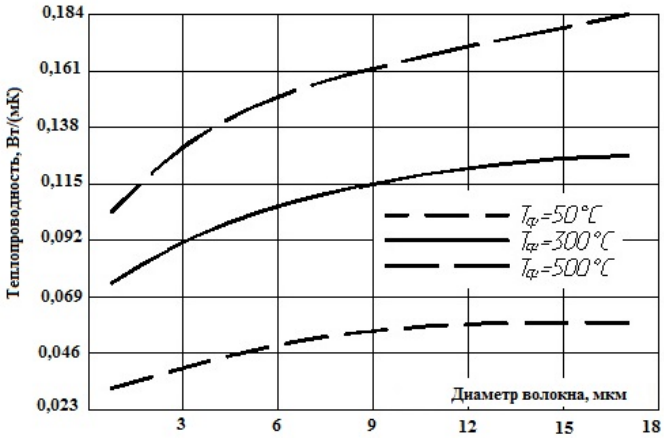


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплопроводности базальтовых волокон от их диаметра при различных температурах

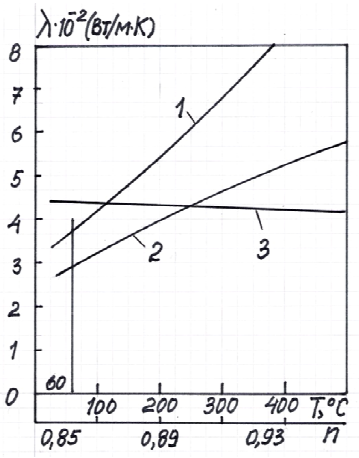


Рис. 2. Зависимость коэффициентов теплопроводности базальтовых волокон (1) и спокойного воздуха (2) от температуры, и теплоизоляции ТИМ (3) от пористости материала n

Методы изготовления материалов определяют его структуру и, следовательно, его механические и теплофизические свойства. Теплоизоляционные изделия из базальтовых волокон и неорганической связки получают методом фильтрационного осаждения [8-10] волокон из жидкой суспензии (пульпы) с последующей термообработкой (сушкой) материала. Для повышения качества изделий и увеличения производительности процесса осаждения базальтовых волокон из пульпы необходимо дополнительно применять вакуумирование камеры фильтрата и финишную подпрессовку слоя осадка, придающую изделию окончательные геометрические размеры и форму.

На рис. 3 показаны технологические схемы формообразования методом жидкостной фильтрации из коротких базальтовых волокон теплоизоляционных покрытий

труб НКТ в виде невысоких колец и цилиндрических скорлуп. Время $t_ф$, необходимое для осаждения волокон и фильтрации жидкости по схеме рис. 3, *а*, определяется из формул [4]:

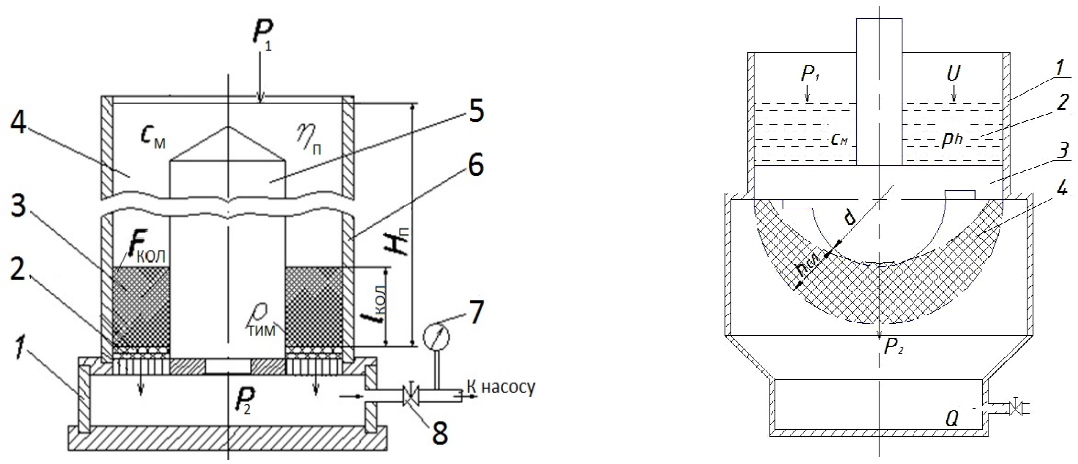
$$t_ф = \frac{\eta_ж h_{сл}}{K_д \rho_п g}\left(\frac{h_{сл}}{H_п} + \ln\frac{H_п}{h_{сл}} - 1\right)$$

$$K_Д = \frac{c\, d_В^2\ n^3}{16\ (1-n)}, \qquad (3)$$

где $\eta_{ж}$- динамическая вязкость фильтруемой жидкости, Па·с; $h_{сл}$- толщина слоя осадка волокон, м; $K_д$ - коэффициент проницаемости жидкости через пористую среду, м^2; $\rho_п$ - плотность жидкости (пульпы); g - ускорение свободного падения; $H_п$ – начальная высота столба жидкости (пульпы, суспензии, гидромассы), $H_п = h_{сл}\rho_{сл}/c_м$; $\rho_{сл}$ – плотность сухого осадка, среднее значение по толщине слоя; $c_м$ – массовое содержание волокон в пульпе, г/л; безразмерная величина c = 0,597; $n = 1 - \rho_{сл}/\rho_в$ - пористость волокнистой среды; $\rho_в$ - плотность волокна, кг/м^3;

По уравнению фильтрации определяется объем пульпы, рассчитывается производительность процесса формования изделия на проектируемом технологическом оборудовании. Большее время фильтрации соответствует работе при меньших концентрациях суспензии и меньшем гидравлическом давлении. При свободном фильтрационном осаждении волокон из пульпы время набора слоя осадка велико и не полностью решается вопрос равноплотности материала по высоте и геометрии поверхности изделия. Так время осаждения волокон из пульпы с концентрацией $c_м$ = 40 г/л для формирования цилиндрического кольца (стакана) высотой 100 мм, согласно зависимостям (3), составит не менее 1,5 часа.

Для сокращения времени изготовления длинномерных цилиндрических скорлуп необходимо применять схему формования их с плоскости образующей цилиндра (рис. 3, *б*). Сначала производится осаждение основного объема волокон, а затем, не прерывая процесса, вводится оправка–пуансон, фильтрация волокон и формование замка ТИП заканчивается. При такой схеме фильтрации резко снижается высота столба пульпы и время изготовления изделия, а также значительно упрощается конструкция технологической оснастки.



а б

Рис. 3. Технологические схемы жидкостного формования из коротких базальтовых волокон теплоизоляционных колец (а): 1 - камера; 2 - фильтровальная перегородка; 3 - слой волокон; 4 - пульпа; 5 –оправка; 6 - корпус (труба); 7 - вакуумметр; 8 - запорный вентиль и цилиндрических скорлуп (б): 1 – камера; 2 – пульпа; 3 – пуансон; 4 – слой волокон

Технология подготовки суспензии и формование из коротких базальтовых волокон ТИП насосно-компрессорных труб.

Разработанный технологический процесс подготовки гидромассы из коротких базальтовых волокон для формования теплоизолированного покрытия НКТ включает в следующие основные операции.

1. Входной контроль основных компонентов на наличие соответствующего сертификата.

2. Подготовка компонентов. Процентное содержание не волокнистых включений в состоянии поставки: фильерное волокно - 5,8 %; безфильерное волокно – до 32 %.

2.1. Подготовка базальтового волокна.

2.1.1. Наиболее предпочтительным является методом дезинтеграции волокнистой массы в механических мешалках пропеллерного типа (рис. 4) с одновременной очисткой исходной массы от не волокнистых включений до 90 %. Для получения волокон длиной 1,0-1,5 мм производится дезинтеграция исходных волокон в пропеллерной мешалке. При концентрации исходных волокон в воде равной 15-20 г/л и скорости вращения механической мешалки 1200-1500 об/мин, время дезинтеграции базальтовых волокон составляет 8-15 мин.

Рис. 4. Исходные базальтовые волокна, подготовка их к дезинтеграции и очистки от не волокнистых включений

Рис. 5. Волокнистый полуфабрикат после дезинтеграции и очистки от примесей

Процесс дезинтеграции может быть представлен как физический процесс гидродинамического воздействия жидкости на ватообразную (рис. 4) массу минеральных волокон с целью ее разъединения, уменьшения в длине и физико-химический процесс создания двухфазной дисперсной системы «короткие минеральные волокна - жидкость». Очистка волокон приводит к существенному уменьшению плотности материала теплоизоляции. Кроме того, материал, изготовленный из волокна прошедшего предварительную очистку от не волокнистых включений, имеет равномерную структуру по всему объему изделия.

2.1.2. Для получения полуфабриката дезинтегрированная волокнистая гидромасса из смесителя порциями сливается в прямоугольную пресс-форму размером 200х200 мм (рис. 5) с перфорированным дном. Гидромасса в пресс-форме поджимается собственным весом пуансона, фильтрат через перфорированное дно удаляется вакуумированием.

2.1.3. Далее полуфабрикат поступает в сушильную камеру для полного удаления влаги при температуре 150 – 200 °С. Полученный после сушки полуфабрикат может быть использован в любое время, независимо от срока хранения.

2.2. Подготовка минеральной связки на основе оксида $A1_2O_3$.

Назначение связующего в волокнистых теплоизоляционных материалах – скрепление отдельных минеральных волокон между собой в местах их соприкосновения для придания изделия прочности и упругости. В качестве связующего выбран гидрооксид алюминия, получаемый из солей алюминия при осаждении его раствором аммиака в водной среде.

2.2.1. Для приготовления 50 литров коллоидного раствора алюминия необходимо взять 13,5 кг $Al_2(SO_4)_3$ $18H_2O$. Раствор алюминия готовится заранее. Конгломераты оксида алюминия (крупные дробятся) после взвешивания заливаются горячей водой (60-80 °С) на сутки. Затем осуществляется перемешивание и объем раствора доводится до 50 литров.

2.2.2. Вторым компонентом, участвующим в образовании связующего, является водный раствор аммиака. Он готов к употреблению в состоянии поставки и используется непосредственно при приготовлении гидромассы.

3. Дозирование компонентов для приготовления гидромассы.

3.1. Дозирование базальтового волокна весовое. Осуществляется на электронных весах, точность дозирования до 1 %. Необходимое количество БСТВ для получения заданного полуцилиндра с плотностью 0,15 г/см^3 – 125 г.

3.2. Дозирование раствора сульфата алюминия объёмное, осуществляется мерной ёмкостью, точность дозирования до 1 %. Необходимое количество раствора сульфата алюминия – 110 мл.

3.3. Дозирование воды объёмное. Точность дозирования до 1 %. Необходимое количество воды – 8 л.

3.4. Дозирование аммиака водного объёмное. Точность дозирования до 1 %. Необходимое количество аммиака водного – 23 мл.

4. Приготовление рабочей гидромассы.

4.1. Для приготовления дозированного количества рабочей гидромассы взвешивается на электронных весах 125 г измельченное и очищенное волокно (полуфабрикат).

4.2. Взвешенное волокно помещается емкость, добавляется вода в количестве 8 литров, 110 мл раствора сульфата алюминия и перемешивается вручную при помощи деревянной лопатки в течение 2-3 минут.

В гидромассу при непрерывном перемешивании добавляется 23 мл раствора аммиака и перемешивают ещё в течение 3-5 минут. При этом происходит процесс образования гидрооксида алюминия во всем объеме гидромассы.

5. Формование изделий.

5.1. Приготовленную гидромассу из ёмкости наливают в корпус с перфорированным промежуточным дном (рис. 6). Перфорированное дно выполнено по форме и размерам, соответствующим наружной поверхности полуцилиндра (скорлупы). Включается вакуум и в гидромассу опускается сборный пуансон, состоящий из трех элементов (рис. 7). Центральный элемент формирует внутренний диаметр полуцилиндра, два боковых элемента подвижны относительно центрального элемента и формирует поверхность сечения цилиндрической скорлупы.

Окончательное формование изделия производится совместной подпрессовкой одновременно всеми тремя элементами пуансона. После окончательной подпрессовки и удаления фильтрата из пресс формы извлекается пуансон и отформованный полуцилиндр (скорлупа).

Рис. 6. Переливание приготовленной гидромассы в рабочую емкость

Рис. 7. Вакуумирование камеры и подпрессовка слоя осадка волокон

6. Сушка изделий

6.1. Сушка полуцилиндра осуществляется в заневоленном состоянии печах сопротивления и при температуре 110-120 °С. Для этого изготавливается специальная оснастка. Отформованный полуцилиндр устанавливается на основание (рис. 8,а), повторяющий в точности внутренние размеры полуцилиндра, с изолирующей прокладкой (стеклоткань). Сверху на отформованный полуцилиндр устанавливается верхняя часть оснастки, повторяющий наружные размеры и геометрию полуцилиндра и поджимается к основанию при помощи стяжных болтов.

а б

Рис. 8. Технологическая оснастка для сушки цилиндрических скорлуп

Верхняя часть оснастки выполнена из перфорированного листа (рис. 8,б) для выхода пара при сушке. Торцы полуцилиндра поджимаются специальными шайбами с ограничивающей втулкой по длине полуцилиндра. После сушки в заневоленном

состоянии изделия приобретают заданную форму и размеры.

Рис. 9. Общий вид готовых цилиндрических скорлуп

7. Контроль теплозвукоизоляционных изделий.

7.1. Контроль осуществляется на соответствие размеров изделия.

7.2. Внешний визуальный осмотр изделий на наличие дефектов - сколов, трещин, расслоений.

7.3. Взвешивание изделий, определение плотности и пористости теплоизоляционного материала.

Готовые теплоизоляционные покрытия НКТ в виде цилиндрических скорлуп, показаны на рис. 9. Геометрические параметры оказались практически равными и с небольшими погрешностями составили (рис. 9): $D_{тип}$ =110±0,2 мм; $d_{тр}$ = 60 ± 0,2 мм; $l_{тип}$ = 255±0,1 мм; $h_{тип}$ = 25±0,1 мм. Средняя масса скорлуп была равна 0,1327 кг, плотность материала $\rho_{тип}$ = 156±3,4 кг/м^3, а пористость волокнистой композиции составила 94 %.

Выводы

1. Определены структурные параметры, форма и геометрические размеры теплоизоляционных покрытий насосно-компрессорных труб из коротких базальтовых волокон в виде колец и цилиндрических скорлуп.
2. Исследована технология подготовки суспензии и процесс формования из коротких базальтовых волокон теплоизоляции насосно-компрессорных труб методом жидкостной фильтрации.
3. Для повышения качества изделий и увеличения производительности процесса фильтрационного осаждения волокон предложено применять схему формования скорлуп с плоскости образующей цилиндра, одновременным вакуумированием камеры фильтрата и подпрессовкой слоя осадка в заданные размеры изделия.

4. Полученные методом фильтрационного осаждения из коротких базальтовых волокон цилиндрические скорлупы удовлетворяют предъявляемому к ним качеству.

Список литературы

1. 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.
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. 2012128161 Российская Федерация. 2012. Бюл. № 31. 3 с.
4. Баданина Ю.В., Комков М.А., Тарасов В.А., Моисеев А.В., Тимофеев М.П. Моделирование и экспериментальное определение технологических параметров жидкостного формования базальтовой теплоизоляции насосно-компрессорных труб // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. DOI: 10.7463/0815.9328000
5. Кудимов В.И., Богомольный Е.И., Завьялов М.П., Багиров Г.Р.: пат. 97114110/03. 1999. Бюл. № 4. 9 с.
6. Джигрис Д.Д., Волынский А.К., Козловский П.П. Основы технологии получения базальтовых волокон и их свойства // Базальтовые волокнистые композиционные материалы и конструкции. Киев: Наукова думка, 1980. 81 с.
7. Базальтовое супертонкое волокно «MINOL».Нижегородский завод тепло- и звукоизоляционных материалов. Режим доступа: http://uteplitel-minol.ru/holst/ (дата обращения 27.02.2015).
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. Леонтьев Н.Е. Основы теории фильтрации. М.: Изд-во ЦПИ при механико-математическом факультете МГУ, 2009. 88 с.
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. Режим доступа: http://engjournal.ru/catalog/machin/hidden/1203.htm (дата обращения: 01.03.2015).