

УДК 662.998.3:666.189

**Моделирование и экспериментальное
определение технологических параметров
жидкостного формования базальтовой
теплоизоляции насосно-компрессорных труб**

Баданина Ю. В.^{1,*}, Комков М. А.¹,
Тарасов В. А.¹, Тимофеев М. П.¹,
Моисеев А. В.²

[*julia555-90@yandex.ru](mailto:julia555-90@yandex.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

²ЗАО "КОМПОМАШ-ТЭК", Москва, Россия

Статья подготовлена в рамках раздела «Энергоэффективная энергетика» ФЦП РФ (Соглашение о субсидии №14.579.21.0024 от 5 июня 2014г.). Показано, что для насосно-компрессорных труб (НКТ), работающих при температурах до 420°C, наиболее эффективной теплоизоляцией является высокопористый материал на основе коротких базальтовых волокон и минеральной связки из глинозема. Получены аналитические зависимости, определяющие производительность процесса жидкостного формования из базальтовых волокон теплоизоляционных покрытий труб НКТ. Установлены технологические параметры изготовления методом фильтрационного осаждения базальтовых покрытий труб НКТ в виде цилиндров и цилиндрических скорлуп. С учетом теплофизических характеристик базальтовых волокон и структуры высокопористой теплоизоляции определены плотность материала и толщина покрытий труб НКТ.

Ключевые слова: насосно-компрессорные трубы, базальтовые теплоизоляция, короткие волокна, метод фильтрационного осаждения, пористость материала, коэффициент теплопроводности, цилиндрические кольца и скорлупы

Введение

Создание высокопористой, низкоплотной и экологически чистой теплоизоляции из доступных и дешевых базальтовых волокон для работы изделий при температурах до 700 °C является важной научно-технической задачей. Одним из эффективных направлений добычи высокоплотных и вязких нефтей с больших глубин является освоение технологии паротеплового воздействия на нефтяные пласты путем длительной закачки в них перегретого водяного пара с начальной температурой до 420°C и давлением до 35 МПа [1-4]) таким образом, чтобы в приповерхностной зоне скважины за обсадной трубой температура цементного камня составляла 60 °C.

В качестве материала для теплоизоляционного покрытия (ТИП) насосно-компрессорных труб (НКТ), длительное время работающих при температурах до 400 °С и более, может быть использован теплозащитный материал марки ТЗМК-10 [5] на основе мелкодисперсного кварцевого волокна диаметром 1,5-2,0 мкм, разработанный для изготовления теплозащитных плиток ВКС «Буран». К недостаткам материала ТЗМК-10 можно отнести лишь высокую стоимость его производства и повышенный коэффициент теплопроводности (0,06 Вт/(м•К)) при нормальной температуре.

Более дешевая, но не менее эффективная теплоизоляция может быть изготовлена из короткого базальтового волокна. Экспериментально установлено [6-8], что теплоизоляционный материал (ТИМ) на основе базальтового супертонкого (диаметром 0,5-3,0 мкм) волокна (БСТВ) и связки из глинозема, как и теплоизоляция на основе стеклянных микросфер марки МС-ВП-А9 и органо-силикатной композиции ОС-11-07, при нагреве образцов до температуры 400-420°С обладает низким коэффициентом теплопроводности в этом диапазоне температур в среднем равным 0,041-0,042 Вт/(м•К).

Сферопластики имеют вдвое большую плотность по сравнению с теплоизоляцией из коротких базальтовых волокон с минеральной связкой, но при высокой температуре и длительном нагреве сферопластики обугливаются и растрескиваются. При этом ТИМ на основе базальтового волокна проявляет высокую вибростойкость, хорошо сохраняет свою форму, а химическая стабильность у него значительно выше по сравнению с теплоизоляцией из сферопластиков. Основным технологическим методом изготовления ТИМ на основе коротких базальтовых волокон является метод фильтрационного осаждения волокон из жидкой суспензии (пульпы), который применяется при изготовлении теплозащитных плиток и цилиндрических колец [9-10] малой высоты.

Целью работы является определение параметров процесса изготовления методом фильтрационного осаждения из коротких базальтовых волокон и минеральной связки высокопористых теплоизоляционных покрытий труб НКТ.

1. Фильтрационный анализ

Технология изготовления коротковолокнистых теплоизолирующих конструкций (покрытий) представляет собой совокупность отдельных операций, включающих очистку и фрагментацию исходных волокон, подготовку гидромассы (пульпы) из коротких волокон, жидкостное формование и температурную обработку изделия. При этом процесс фильтрационного осаждения волокон на технологическую оснастку является главным, поскольку определяет структуру материала покрытия, а, следовательно, его теплофизические и механические характеристики.

На величину скорости фильтрации оказывают влияние как свойства гидромассы (температура и вязкость рабочей жидкости, дискретность волокон, дисперсность и форма частиц твердой фазы - связки), так и условия ее фильтрования, определяемые величиной гидростатического давления, вакуумированием камеры фильтрата и величиной пористости слоя осадка. Использование малых давлений при малом содержании волокон в

пульпе улучшает структурные и теплофизические характеристики формируемого изделия за счет достижения равномерного распределения волокон по объему материала.

Математическое моделирование процесса формирования теплоизоляционных конструкций из коротковолокнистого материала должно базироваться на физических принципах течения жидкости через пористое тело. При этом в моделях необходимо использовать константы, размерные или безразмерные параметры, легко определяемые экспериментально в зависимости от физических свойств жидкости и структурных характеристик волокнистого материала.

Процесс жидкостного формирования теплоизоляции труб НКТ из коротких базальтовых волокон не может быть мгновенным и для его протекания требуется некоторое время. Выявление факторов, влияющих на скорость фильтрации, и зависимости между ними, выраженные в аналитической форме, является важной задачей для разработки техпроцесса изготовления изделий на основе коротковолокнистых композиций. При этом влияние реологических факторов, то есть восстановление среды после окончания процесса в данной постановке задачи, не учитывается. Другие ограничения будут оговорены при дальнейшем изложении материала статьи.

Основу физико-математического анализа фильтрации составляет описание движения жидкости (фильтрата) в порах слоя волокон. Истинную скорость движения жидкости в пористом слое из волокон и полидисперсных частиц связки установить очень трудно, так как учесть размеры и конфигурацию каждой поры практически невозможно. Поэтому вместо истинной скорости движения жидкости пользуются ее условной величиной, называемой скоростью фильтрации.

Скорость фильтрации или течения жидкости $u_{\phi}(t)$ через пористый слой уже осажденных волокон (рис. 1), определяется законом Дарси [11]

$$u_{\phi}(t) = \frac{K_d p}{\eta_{\text{ж}} h_{\text{сл}}}, \quad (1)$$

где K_d - коэффициент проницаемости жидкости через пористую среду, м^2 ; p - перепад давления на слое волокон, Па; $\eta_{\text{ж}}$ - динамическая вязкость фильтруемой жидкости, Па·с; $h_{\text{сл}}$ - толщина слоя осадка волокон, м.

Заменим в (1) давление p суммой высоты столба жидкости и давлением вакуумирования Δp камеры фильтрата, а текущий набор толщины слоя осадка через объем жидкости, профильтрованный через перфорированную перегородку $h_{\text{сл}} = c_m (H_{\text{п}} - h) / \rho_{\text{сл}}$, получим дифференциальное уравнение, определяющее время фильтрации пульпы:

$$u_{\phi}(t) = \frac{K_d (\rho_{\text{п}} g h + \Delta p) \rho_{\text{сл}}}{\eta_{\text{п}} c_m (H_{\text{п}} - h)} = \frac{dh}{dt}. \quad (2)$$

Здесь $\rho_{\text{п}}$ - плотность жидкости (пульпы), кг/м^3 ; g - ускорение свободного падения, м/с^2 ; h - текущая высота столба жидкости, м; $\rho_{\text{сл}}$ - плотность сухого осадка, средняя по толщине слоя, кг/м^3 ; c_m - массовое содержание волокон в пульпе, кг/м^3 ; $H_{\text{п}}$ - начальная высота столба жидкости (гидромассы, суспензии, пульпы), м.

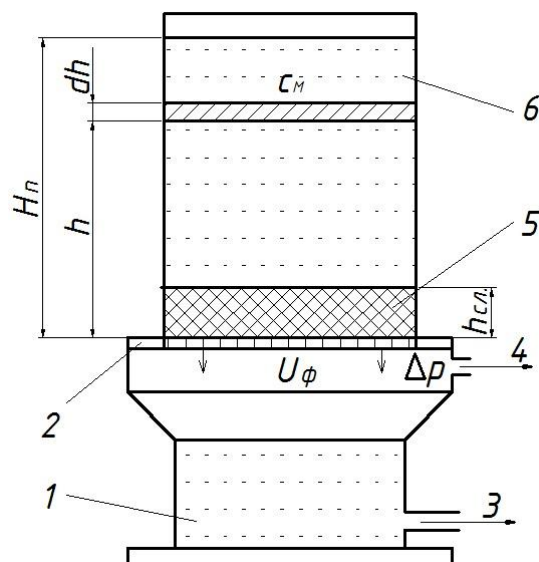


Рис. 1. Схема фильтрационного осаждения коротких базальтовых волокон из пульпы на перфорированную оправку: 1 - фильтр; 2 – перфорированная перегородка; 3 – слив фильтра; 4 – вакуумирование камер; 5 – слой волокнистого осадка; 6 - пульпа

После интегрирования уравнения (2) найдем время, необходимое для осаждения волокон из пульпы по схеме, показанной на рис. 1:

$$t_{\phi} = \frac{\eta_{\text{п}} h_{\text{сл}}}{K_{\text{д}} \rho_{\text{п}} g} \left[\frac{h_{\text{сл}}}{H_{\text{п}}} + \left(1 + \frac{\Delta p}{H_{\text{п}} \rho_{\text{п}} g} \right) \ln \left(\frac{1 + \Delta p / H_{\text{п}} \rho_{\text{п}} g}{h_{\text{сл}} / H_{\text{п}} + \Delta p / H_{\text{п}} \rho_{\text{п}} g} \right) - 1 \right]. \quad (3)$$

Если вакуумирование камер фильтра отсутствует, то из (3) следует

$$t_{\phi} = \frac{\eta_{\text{п}} h_{\text{сл}}}{K_{\text{д}} \rho_{\text{п}} g} \left(\frac{h_{\text{сл}}}{H_{\text{п}}} + \ln \frac{H_{\text{п}}}{h_{\text{сл}}} - 1 \right). \quad (4)$$

По уравнению фильтрации определяется объем пульпы и рассчитывается производительность процесса формования изделия на проектируемом технологическом оборудовании. Большее время фильтрации соответствует работе при меньших концентрациях суспензии и меньшем гидравлическом давлении.

В уравнениях (1-4) коэффициент проницаемости $K_{\text{д}}$ представляет собой проводимость по отношению к жидкости через пористую среду под действием приложенного градиента давления и имеет размерность площади, а его величина имеет порядок квадрата характерного размера пор. Коэффициент проницаемости по своей природе является структурной характеристикой, определяется, в основном, геометрией порового пространства и по И. Козени [12] зависит от удельного объема открытых пор $n = V_{\text{п}} / V_{\text{сл}}$ в кубе, поделенного на квадрат удельной поверхности волокон S_{y} , медленно обтекаемых жидкостью:

$$K_{\text{д}} = \frac{c n^3}{S_{\text{y}}^2} = \frac{c n^3}{S_0^2 \vartheta_{\text{в}}} = \frac{c d_{\text{в}}^2 n^3}{16 (1-n)}. \quad (5)$$

Здесь $V_{\text{п}}$ – объем пор в слое осадка $V_{\text{сл}}$, м^3 ; c – безразмерная величина: для цилиндрических пор $c = 0,5$; для треугольных пор $c = 0,597$; $n = 1 - \rho_{\text{сл}}/\rho_{\text{в}}$ – пористость волокнистой среды; $\rho_{\text{в}}$ – плотность волокна, $\text{кг}/\text{м}^3$; S_0 – удельная поверхность волокон единичной длины, $S_0 = S_{\text{в}}/V_{\text{в}} = 4/d_{\text{в}}$, м^2 ; $d_{\text{в}}$ – средний (эффективный) диаметр волокон, м ; $\vartheta_{\text{в}}$ – объемное содержание волокон в слое осадка, $\vartheta_{\text{в}} = 1 - n$. В формуле (5), записанной позднее Р.С. Карманом [13], величина $(1 - n)$ была взята во второй степени. Хотя в квадрате, на наш взгляд, должна быть только удельная поверхность волокон S_0 , но не их объемное содержание в пористом материале. Так при большой пористости, например, при $n = 0,9$ значения $K_{\text{д}}$, подсчитанные по формуле Р.С. Кармана и полученные экспериментально, отличаются почти на порядок. Для пористости $n = 0,30-0,35$, характерной для конструкционных ПКМ, эти различия составляют не более 30% и при некотором разбросе диаметров волокон в композитном материале становятся мало заметными при расчетах $K_{\text{д}}$.

Для оценки применимости формулы (5) нами были проведены экспериментальные исследования по определению коэффициента проницаемости волокнистых образцов, которые проливались технической водой на специальной установке. Модельные образцы ТИМ площадью $A = 100 \text{ см}^2$ имели одинаковую поверхностную плотность (развес) $\gamma^* = \rho_{\text{в}}(1 - n)h_{\text{сл}} = 0,60 \text{ г}/\text{см}^2$ и были изготовлены из некрученных кварцевых нитей с линейной плотностью $104 \text{ мг}/\text{м}$ и диаметром волокон в нитях 12 мкм . Короткие волокна получали способом рубки нитей в приспособлении на отрезки длиной $6,7 \text{ мм}$, $13,4 \text{ мм}$ и $20,1 \text{ мм}$. Плотность кварцевых волокон $\rho_{\text{в}} = 2,13 \text{ г}/\text{см}^3$.

В процессе проливок волокнистых образцов замерялись перепад давления на слое ΔP по вакуумметру, объемный секундный расход жидкости Q по расходомеру и толщина слоя $h_{\text{сл}}$, а пористость образцов рассчитывалась по формуле

$$n = 1 - M_{\text{обр}}/(A \rho_{\text{в}} h_{\text{сл}}), \quad (6)$$

где $M_{\text{обр}} = A \gamma^*$ – масса образца.

По результатам проливок были рассчитаны экспериментальные значения коэффициента проницаемости $K_{\text{д}}$ по уравнению, записанному на основании формулы (1):

$$K_{\text{д}} = \frac{Q \eta_{\text{ж}}}{A (\Delta P / h_{\text{сл}})}. \quad (7)$$

2. Обсуждение экспериментов

На рис. 2 представлены аналитическая зависимость коэффициента проницаемости от пористости волокнистого материала, рассчитанная по формуле (5), и экспериментальные значения пористости n и коэффициента $K_{\text{д}}$, рассчитанные по формулам (6) и (7). А на рис. 3 представлена экспериментальная зависимость пористости образцов от длины рубленых волокон. Из рис. 2 следует, что зависимость, рассчитанная по (5) сравнительно хорошо согласуется с результатами проливок волокнистых образцов. А из рис. 3 видно, чем короче рубленые волокна, тем больше пористость материала.

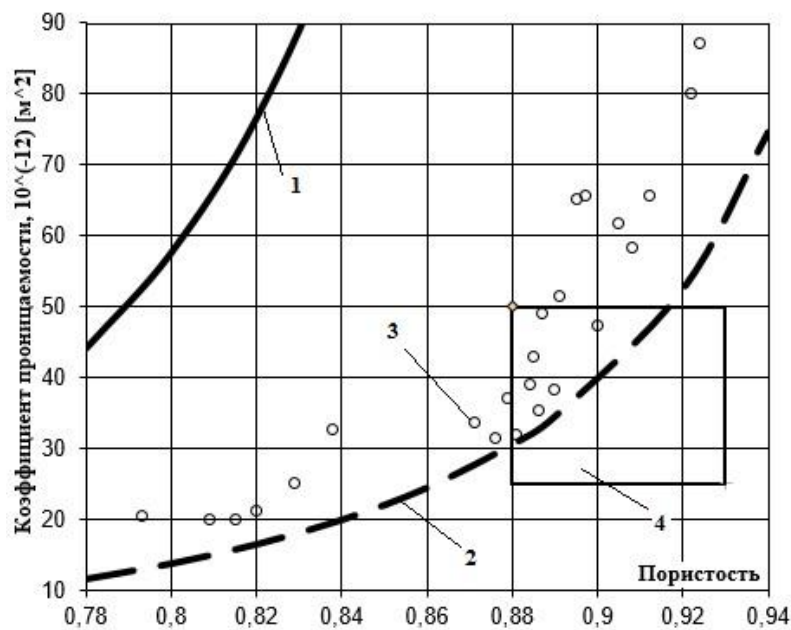


Рис. 2. Зависимость коэффициента проницаемости K_d образцов из рубленых волокон от пористости материала n : 1 – по формуле Козени-Кармана; 2 – по формуле (5); 3 – экспериментальные значения; 4 – область результатов экспериментальных исследований на образцах из стекловолокна [12]

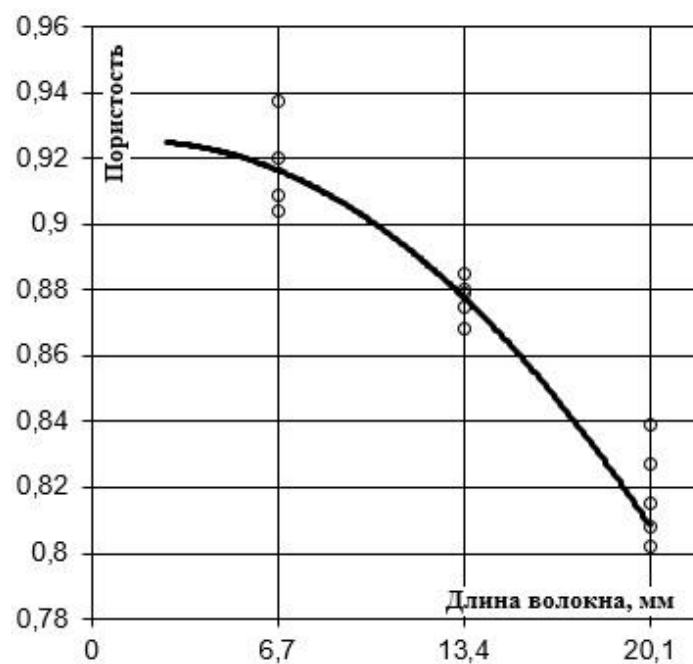


Рис. 3. Зависимость пористости образцов от длины коротких волокон

В то же время длина волокон не может быть очень малой, меньшей, чем $l_b = 1,0-1,5$ мм, так как в этом случае очень короткие волокна при фильтрационном осаждении частично ложатся под углом или перпендикулярно к плоскости образца или изделия. При этом снижается прочность композиции на сжатие, а пористая структура материала

становится неустойчивой. С другой стороны, с уменьшением длины волокон (рис. 3) увеличивается пористость ТИМ, что способствует снижению коэффициента теплопроводности материала. Для получения волокон длиной 1,0-1,5 мм производится дезинтеграция исходных штапельных волокон в пропеллерной мешалке. Зависимость длины волокон от времени дезинтеграции показана на рис. 4. При концентрации волокон в воде $c_m = 15-20$ г/л и скорости вращения механической мешалки 1200-1500 об/мин, время дезинтеграции кварцевых волокон составляет 3-5 мин, а базальтовых - соответственно 8-15 мин.

Выбор минимально возможного диаметра волокна для изготовления базальтового ТИМ обусловлен тем, что минимальной теплопроводностью обладают волокна (рис. 5), имеющие диаметр менее 3 мкм [14], кроме того при малых диаметрах увеличивается тепловое сопротивление материала за счет возрастания удельной поверхности волокон. Однако при диаметре волокон меньше $d_b \leq 1,5-2,0$ мкм, когда длины волны теплового спектра становятся соизмеримой с его диаметром и электромагнитная волна может обогнуть волокно, композиция становится прозрачной для теплового излучения, соответственно будет увеличиваться и теплопроводность волокнистой композиции в целом. В связи со сказанным для изготовления теплоизоляционного покрытия трубы НКТ в качестве исходного материала было выбрано супертонкое базальтовое волокно – холст БСТВ «MINOL» [15] с диаметром волокон $d_b = 0,5-3,0$ мкм и длиной волокон в холсте $l_b = 50-60$ мм.

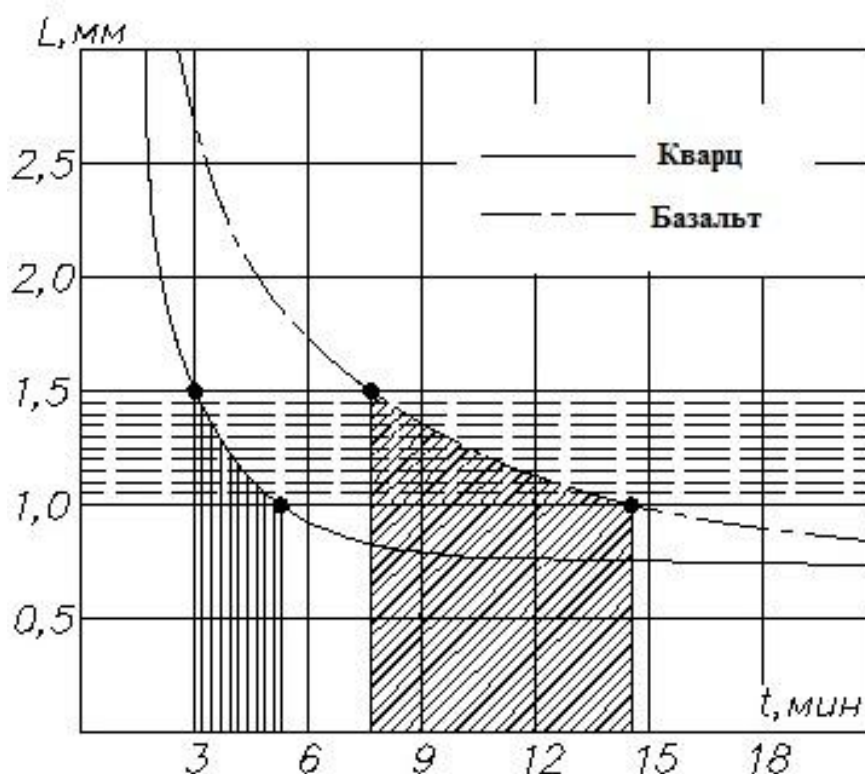


Рис. 4. Зависимость длины l_b волокна от времени t дезинтеграции исходных волокон: 1 – кварцевое волокно; 2 – базальтовое волокно

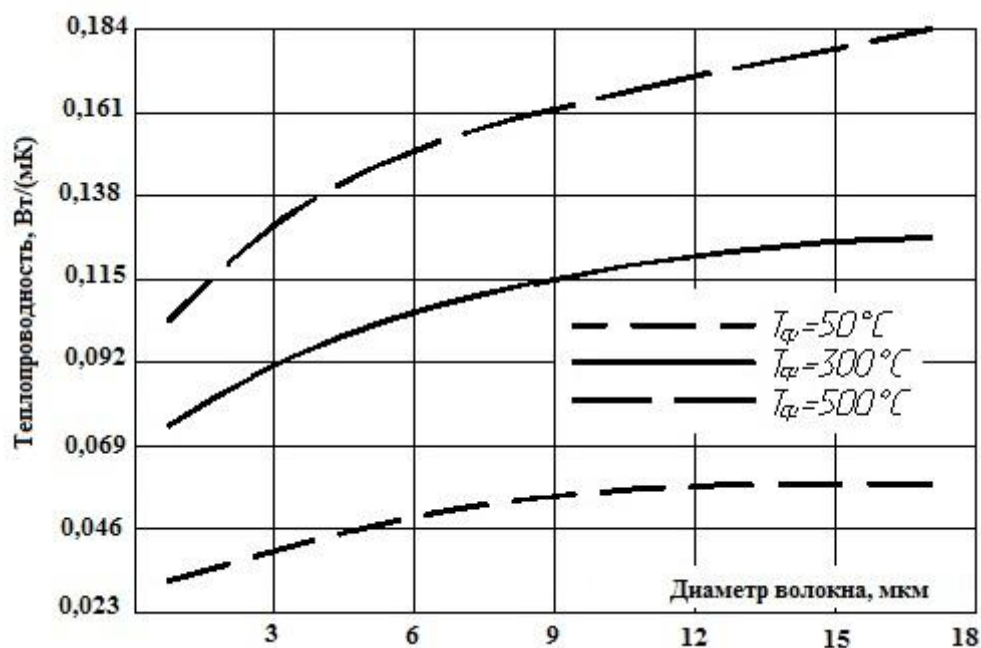


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплопроводности базальтовых волокон от их диаметра при различных температурах

Для определения толщины теплоизоляционного покрытия трубы НКТ найдем средний коэффициент теплопроводности ТИМ в зависимости от пористости волокнистой структуры. Без учета тепловых потерь на излучение Стефана-Больцмана и для спокойного состояния воздуха в порах теплоизоляционного материала его коэффициент теплопроводности может быть записать на основании правила смесей

$$\lambda(n, T) \cong \lambda_{\text{ТИМ}}^{\text{cp}} = n \lambda_{\text{возд}}^{\text{cp}} + (1 - n) \lambda_{\text{БВ}}^{\text{cp}}, \quad (8)$$

где средние значения коэффициентов $\lambda_{\text{БВ}}^{\text{cp}} = 0,0587$ Вт/(м·К) и $\lambda_{\text{возд}}^{\text{cp}} = 0,0413$ Вт/(м·К) для интервала температур от 60 °С до 400 °С определены в [6]. Тогда для материала с пористостью $n = 0,92 \dots 0,94$ средний коэффициент теплопроводности ТИМ будет равен $\lambda_{\text{ТИМ}}^{\text{cp}} = 0,0425$ Вт/(м·К).

Ориентируясь на характеристики вакуумно-изолированных труб НКТ, которые называются также «термокейсами» [4], и для которых допустимой считается потеря теплового потока по длине трубы $q_1 = 150$ Вт/м, можно предварительно рассчитать необходимую толщину ТИП из базальтовых волокон по формуле

$$\frac{q_1}{\pi d} = \frac{2 \lambda_{\text{ТИМ}} (T_1 - T_2)}{d \ln \frac{d + 2h_{\text{ТИМ}}}{d}}, \quad (9)$$

где d – наружный диаметр трубы НКТ, $d = 60$ мм; $T_1 = 400$ °С – температура на внутренней стенке трубы; $T_2 = 60$ °С – температура на наружной стороне базальтового покрытия трубы, $h_{\text{ТИМ}}$ – толщина теплоизоляции трубы, мм. Подставив $\lambda_{\text{ТИМ}}^{\text{cp}}$ из (8) в формулу (9), определим толщину теплоизоляции для трубы НКТ: $h_{\text{ТИМ}} = 25$ мм.

Для увеличения прочности на сжатие высокопористых волокнистых ТИМ применяется высокотемпературная минеральная связка, которая фиксирует волокна в местах их контактов. В качестве связующего выбран оксид алюминия Al_2O_3 , получаемый из солей сернокислого алюминия в водном растворе аммиака, присутствующий в гидромассе в коллоидном состоянии и увеличивающий при этом вязкость жидкой пульпы и фильтрата.

Рецептурный состав гидромассы при изготовлении теплоизолирующих изделий: на 0,95 кг короткого базальтового волокна берется 0,4 л 27 % раствора сернокислого алюминия $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ и 0,07 л 25 % водного раствора аммиака $6NH_4OH$. Образование оксида алюминия происходит в процессе сушки и термообработки изделия при температуре $300^\circ C$. В процессе фильтрационного осаждения необходимо строго контролировать величину кислотности пульпы, вести гидролиз и осаждение волокон при $pH = 7,6 \div 8,4$. В этом случае можно гарантировать расчетное количество окиси алюминия в теплоизоляционном материале в виде связки при сохранении достаточно высокой скорости фильтрации.

При свободном фильтрационном осаждении волокон из пульпы время набора слоя осадка высотой до 100 мм (цилиндрическая втулка) согласно формуле (4) составляет не менее 90 мин и при этом не полностью решается вопрос равноплотности материала по толщине и геометрии поверхности изделия. Динамика уменьшения столба гидромассы во времени представлена на рис. 6.

Однако производительность процесса возрастает в разы за счет вакуумирования камеры фильтрата (рис. 7). При этом величина Δp в формуле (3) является свободным параметром. Давление вакуумирования нужно выбрать таким образом, чтобы толщина и плотность слоя осадка не были бы меньше расчетных (допустимых) значений. При этом время фильтрационного осаждения волокон должно быть меньше времени расслоения гидромассы на жидкую и твердую фазы.



Рис. 6. Зависимость изменения столба гидромассы от времени при свободном фильтровании

По сути, выражение (3) можно рассматривать как закон управления временем фильтрации и плотностью слоя осадка для изготовления изделий из волокнистого теплоизоляционного материала с заданной толщиной $h_{\text{сл}}$.

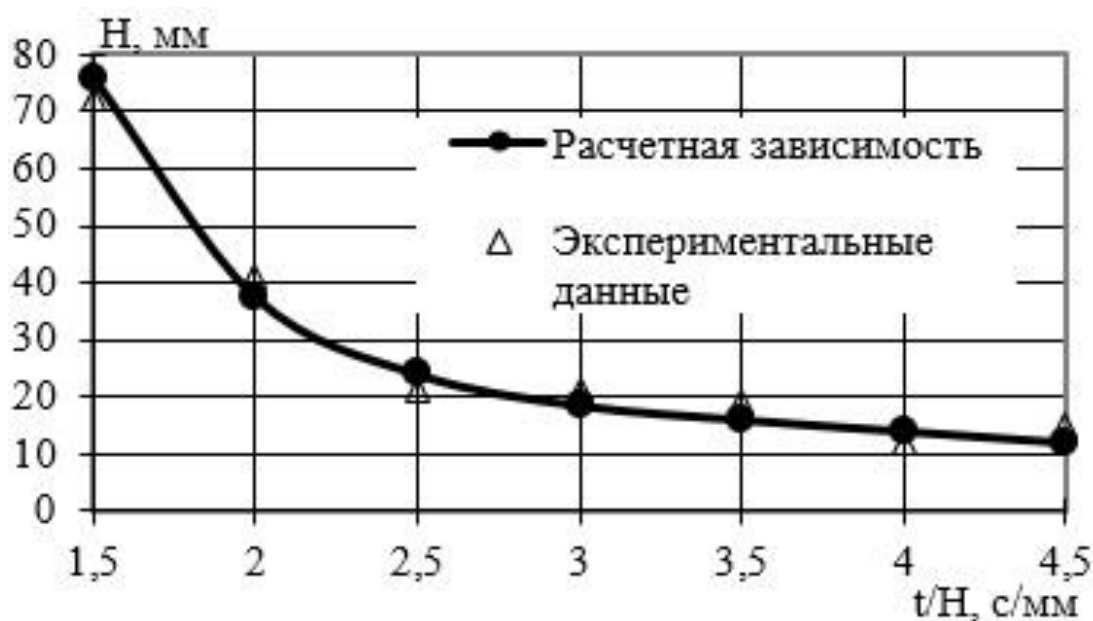


Рис. 7. Зависимость изменения столба гидромассы от времени с вакуумированием и подпрессовкой

При свободном фильтрационном осаждении волокон из пульпы, цилиндрические кольца с высотой стенок более 50-60 мм, имели разброс плотности материала по высоте до 12-15%. Для снижения разноплотности материала необходимо применять метод жидкостной фильтрации с вакуумированием камеры фильтрата и финишной подпрессовкой слоя осадка пуансоном, формирующим окончательные геометрические размеры и форму изделия. Постоянный перепад давления на слое осадка за счет вакуумирования можно устойчиво поддерживать в диапазоне $\Delta p = 50 \dots 70$ кПа.

Для сокращения времени изготовления длинномерных цилиндрических скорлуп из коротких базальтовых волокон методом жидкостной фильтрации необходимо применять схему формования их с плоскости образующей цилиндра (рис. 8). Сначала за короткое время (7-10 мин) 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.

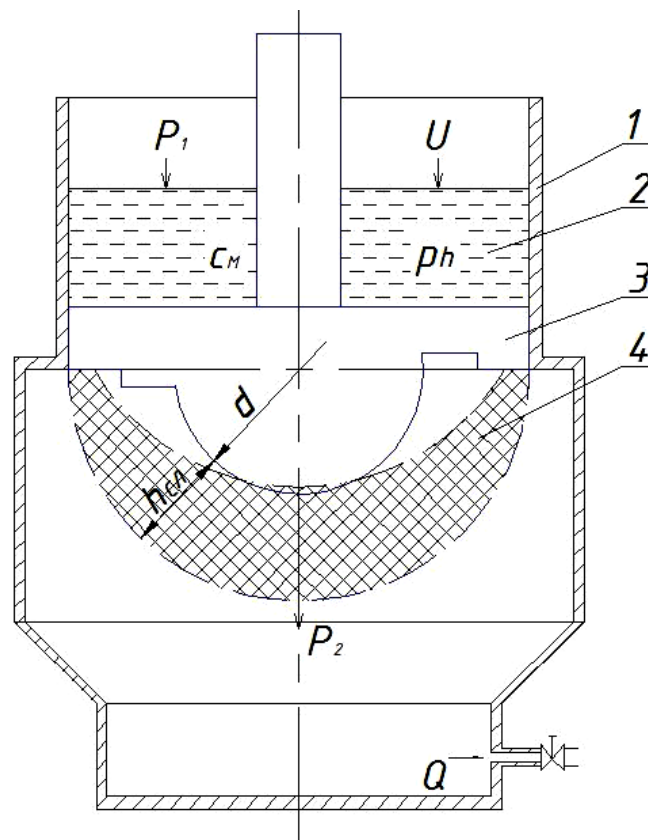


Рис. 8. Схема формирования цилиндрических скорлуп из коротких базальтовых волокон:

1 – камера; 2 – пульпа; 3 – пуансон; 4 – первоначальный слой осадка волокон



Рис. 9. Вид собранных теплоизоляционных базальтовых скорлуп для трубы НКТ

Для определения реальной плотности изделий типа «скорлупа», полученных методом фильтрационного осаждения, были проведены необходимые замеры массы и геометрических параметров изделия. Для эксперимента были взяты изделия из 4-х разных замесов. Геометрические параметры оказались практически равными и с небольшими погрешностями составили (рис. 9): $D_{\text{тип}} = 110 \pm 0,2$ мм; $d_{\text{тр}} = 60 \pm 0,2$ мм; $l_{\text{тип}} = 255 \pm 0,1$ мм; $h_{\text{тип}} = 25 \pm 0,1$ мм. Средняя масса скорлуп оказалась равной 0,1327 кг, плотность материала $\rho_{\text{тип}} = 156 \pm 3,4$ кг/м³, а пористость волокнистой композиции составила 94 %.

Заключение

1) Предложенная математическая модель свободного фильтрационного осаждения коротких волокон из жидкой пульпы описывает динамику формирования теплоизоляционных изделий и позволяет определить рациональные параметры технологического процесса их изготовления.

2) Для повышения качества изделий и увеличения производительности процесса фильтрационного осаждения коротких базальтовых волокон необходимо дополнительно применять вакуумирование камеры фильтрата и финишную подпрессовку слоя осадка, придающую изделию окончательные геометрические размеры и форму.

3) Для увеличения прочности на сжатие высокопористых волокнистых колец и цилиндрических скорлуп необходимо применять минеральную 5-7 % по массе связку на основе оксида Al_2O_3 , которая фиксирует базальтовые волокна в местах их контактов.

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. Т. 11, № 9. С. 57-60.
3. Моисеев В.А., Моисеев А.В., Фролов В.И., Комков М.А. Труба теплоизолированная: пат. на полезную модель 121855 Российская Федерация. 2012. Бюл. № 31. 3 с.
4. Кудимов В.И., Богомольный Е.И., Завьялов М.П., Багиров Г.Р. Теплоизолированная колонна (термоизолированная труба НКТ): пат. 2129202 Российская Федерация. 1999. Бюл. № 4. 9 с.
5. Авиационно-космические системы: сб. ст. / под ред. Г.Е. Лозино-Лозинского, А.Г. Братухина. М.: Изд-во МАИ, 1997. 416 с.
6. 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. № 2. Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/machin/hidden/1203.html> (дата обращения 01.03.2015).
7. Филимонов А.С., Тарасов В.А., Комков М.А., Моисеев В.А., Тимофеев М.П., Герасимов Н.В. Экспериментальный анализ свойств перспективных теплоизоляционных материалов машиностроения, полученных методом фильтрационного осаждения // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. № 9. Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/382.html> (дата обращения 01.03.2015).
8. Филимонов А.С., Тарасов В.А., Комков М.А., Моисеев В.А., Тимофеев М.П., Герасимов Н.В. Влияние связующих на свойства новых теплоизоляционных покрытий с использованием стеклянных микросфер осаждения // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. № 9. Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/383.html> (дата обращения 01.03.2015).
9. Тимофеев М.П. Разработка и исследование фильтрационной технологии изготовления изделий из волокнистых неорганических материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / МГТУ им. Н.Э. Баумана. М., 2007. 16 с.
10. 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.
11. Леонтьев Н.Е. Основы теории фильтрации. М.: Изд-во ЦПИ при механико-математическом факультете МГУ, 2009. 88 с.
12. Коллинз Р. Течение жидкости через пористые материалы: пер. с англ. / под ред. Г.И. Баренблата. М.: Мир, 1964. 351 с.
13. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде: пер. с англ. Москва-Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2006. 640 с.
14. Джигирис Д.Д., Волынский А.К., Козловский П.П. и др. Основы технологии получения базальтовых волокон и их свойства // Базальтовые волокнистые композиционные материалы и конструкции: сб. науч. тр. Киев: Наукова думка, 1980. С. 54-81.
15. Базальтовое супертонкое волокно «MINOL» // Завод БСТВ «MINOL»: сайт компании. Режим доступа: <http://uteplitel-minol.ru/holst/> (дата обращения 01.03.2015).

Simulation and Experimental Determination of Technological Liquid Molding Parameters of Tubing Basalt Insulation

Yu.V. Badanina^{1,*}, M.A. Komkov¹, V.A. Tarasov¹,
M.P. Timofeev¹, A.V. Moiseev²

[*julia555-90@yandex.ru](mailto:julia555-90@yandex.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

²JSC "COMPOMASH-TEK", Moscow, Russia

Keywords: tubing, basalt insulation, short fibers, the method of filtration deposition, porosity, thermal conductivity, cylindrical rings and shells

The article is dedicated to one of the most important and urgent tasks in mechanical engineering development - the creation of low-density and environmentally-friendly thermo-insulation from available cheap basalt fibers for products to operate at temperatures up to 700°C.

One of the most effective applications of such thermo-insulation is to develop and provide highly porous coatings from short basalt fibers by liquid filtration for tubing (T) to supply superheated up to 420° C steam under pressure of 35 MPa in the deep layers with severe high-viscosity oil. Tubing with the short low-density basalt insulation can be used for a greater depth than the vacuum-insulated tubing, which are also called "thermo-cases", and do not fully meet business needs for long-term reliability of oil vacuum tubes, too large mass per unit length of their design and, as a consequence, the impossibility to use such pipes for deep wells.

The aim of the work is to simulate a liquid filtration process of short fibers and determine technological parameters of producing thermal insulation coatings of tubing pipes from basalt fibers and mineral binder shaped as cylinders and cylindrical shells. The paper proposes a mathematical model of free filtration deposition of short fibers from liquid slurry, which describes dynamics of creating thermal insulation products and allows us to determine the rational parameters of their manufacturing process. It shows methods to improve the products quality while forming the thermal insulation by filtration through additional vacuum deposition of a filtrate chamber and the final prepressing of sediment layer, giving dimensions and shape to the final product.

The paper defines a prescription hydro mass composition. It shows that to increase the compressive strength of highly fibrous rings and cylindrical shells it is necessary to use based on oxide Al_2O_3 5-7% by weight mineral binder, which fixes basalt fibers in places of their contacts. It is proved that in order to reduce a manufacturing time of long-length cylindrical shells from short basalt fibers by liquid filtration it is necessary to use the scheme of their molding from a plane of the cylinder element. Taking into account the thermal characteristics of basalt fibers and

highly porous structure of the thermal insulation on the received samples are determined the real porosity, density of material and the thickness of the tubing pipe coatings.

References

1. Moiseev V.A., Andrienko V.G., Frolov V.I., Klokotov Yu.N. Thermal insulation of steam pipelines to transport oil-couple with supercritical parameters. *Neftyanoe khozyaistvo = Oil Industry*, 2012, no. 1, pp. 92-94. (in Russian).
2. Moiseev V.A., Moiseev A.V., Komkov M.A., Frolov V.I. High-temperature energy-efficient oilfield steam pipeline. *Birzha Intellektual'noi Sobstvennosti* [Intellectual Property Exchange], 2012, vol. 11, no. 9, pp. 57-60. (in Russian).
3. Moiseev V.A., Moiseev A.V., Frolov V.I., Komkov M.A. *Truba teploizolirovannaya* [Heat-insulated pipes]. Patent RF, no. 121855, 2012. (in Russian).
4. Kudimov V.I., Bogomol'nyi E.I., Zav'yalov M.P., Bagirov G.R. *Teploizolirovannaya kolonna (termoizolirovannaya truba NKT)* [Insulated column (thermally insulated pipe tubing)]. Patent RF, no. 2129202, 1999. (in Russian).
5. Lozino-Lozinskii G.E., Bratukhin A.G., eds. *Aviatsionno-kosmicheskie sistemy: sb. st.* [Aero-space systems: collected articles]. Moscow, MAI Publ., 1997. 416 p. (in Russian).
6. Komkov M.A., Badanina Yu.V., Timofeev M.P. Developing and testing heat-resistant pipelines coatings made of short basalt fibers. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Journal: Science and Innovation*, 2014, no. 2. Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/machin/hidden/1203.html>, accessed 01.03.2015. (in Russian).
7. Filimonov A.S., Tarasov V.A., Komkov M.A., Moiseev V.A., Timofeev M.P., Gerasimov N.V. Experimental analysis of the properties of advanced thermal insulation materials engineering, obtained by filtration deposition. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Journal: Science and Innovation*, 2012, no. 9. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/382.html>, accessed 01.03.2015. (in Russian).
8. Filimonov A.S., Tarasov V.A., Komkov M.A., Moiseev V.A., Timofeev M.P., Gerasimov N.V. Effect of binders on the properties of the new thermal insulation coatings using glass microspheres. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Journal: Science and Innovation*, 2012, no. 9. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/383.html>, accessed 01.03.2015. (in Russian).
9. Timofeev M.P. *Razrabotka i issledovanie fil'tratsionnoi tekhnologii izgotovleniya izdelii iz voloknistykh neorganicheskikh materialov. Avtoref. kand. diss.* [Development and research of filtration technology the manufacture of fibrous inorganic materials. Abstract of cand. diss.]. Moscow, Bauman MSTU, 2007. 16 p. (in Russian).
10. Tarasov V.A., Smirnov Yu.V., Timofeev M.P., Filimonov A.S. Modes of Filtrational Sedimentation of Heat-Insulation Elements of Space-Rocket Technics. *Polet. Obshcherossiiskii nauchno-tekhnicheskii zhurnal* [Flight. All-Russian Scientific and Technical Journal], 2007, no. 5, pp. 52–55. (in Russian).

11. Leont'ev N.E. *Osnovy teorii fil'tratsii* [Fundamentals of the theory of filtration]. Moscow, Publishing House of the CPI at the Mechanics and Mathematics Faculty of Moscow State University, 2009. 88 p. (in Russian).
12. Collins R.E. *Flow of Fluids Through Porous Materials*. New York, Reinhold Publishing Corp., 1961. (Russ. ed.: Collins R.E. *Techenie zhidkosti cherez poristye materialy*. Moscow, Mir Publ., 1964. 351 p.).
13. Muskat M. *The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media*. Ann Arbor, Michigan, J.W. Edwards, Inc., 1946. (Russ. ed.: Muskat M. *Techenie odnorodnykh zhidkosti v poristoi srede*. Moscow - Izhevsk, Institute of Computer Science Publ., 2006. 640 p.).
14. Dzhigiris D.D, Volynskii A.K., Kozlovskii P.P., et al. Fundamentals of technology of basalt fibers and their properties. *Bazal'tovye voloknistye kompozitsionnye materialy i konstruksii: sb. nauch. tr.* [Basalt fiber composite materials and structures: collected papers]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1980, pp. 54-81. (in Russian).
15. Bazal'tovoe supertonkoe volokno "MINOL" [Super thin basalt fiber "MINOL"]. The plant BSTV "MINOL": company website. Available at: <http://uteplitel-minol.ru/holst/> , accessed 01.03.2015. (in Russian).