

А.С. Филимонов, В.А. Тарасов, М.А. Комков,
В.А. Моисеев, М.П. Тимофеев, Н.В. Герасимов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СВОЙСТВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МАШИНОСТРОЕНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ОСАЖДЕНИЯ

Разработаны технология и методика назначения параметров изготовления теплоизоляционных материалов (ТИМ) из базальтовых волокон методом фильтрационного осаждения. Предложена методика определения геометрических размеров образцов ТИМ на основе базальтовых волокон и стеклянных микросфер. Экспериментально установлено, что указанные ТИМ при нагреве до температуры 400 °С обладают низкой теплопроводностью, равной 0,04 Вт/(м·К). Намечены пути дальнейших исследований ТИМ с другими, более теплостойкими связующими.

E-mail: alexf72@mail.ru

Ключевые слова: теплоизоляционные материалы, тепловые испытания, базальтовые волокна, метод фильтрационного осаждения, сферопластики, теплопередача, температурное поле, теплопроводность, стеклянные микросферы.

Повышение эффективности ТИМ неразрывно связано с разработкой новых материалов, технологий и методов их получения. Тепло- и звукоизоляционные материалы не только уменьшают потери теплоты и позволяют экономить энергетические ресурсы, но во многих случаях способствуют интенсификации технологических процессов, улучшению конструктивных решений новых приборов и механизмов.

Тепловая изоляция — неотъемлемый конструктивный элемент теплоэнергетического оборудования, значительно влияющий на надежность и безопасность систем и оборудования ядерной энергетики, особенно при эксплуатации атомных электростанций. Создание легких экологически чистых и негорючих ТИМ является одной из задач при разработке новых систем космических летательных аппаратов и орбитальных станций.

Материалы, применяемые для теплоизоляции, выполняют функцию теплового барьера, защищают конструкцию от температурных перепадов и сохраняют в них условия рабочей среды. В зависимости от состава ТИМ можно разделить на группы.

Основой материалов первой группы служат пенополистирол и пенополиуритан. Эти ТИМ обладают достаточно высокой теплоизоляционной и звукопоглощающей способностью при малой объемной

массе. Однако они легко воспламеняются, выделяют токсичные вещества, поэтому их применение в зонах повышенных температур весьма ограничено.

Материалы второй группы состоят из минеральных волокон и органического связующего. Они более термостойки, выдерживают более высокие температуры, но при нагреве выделяют токсичные вещества и теряют механическую прочность.

К материалам третьей группы относят высокотемпературные минеральные волокна и нитевидные кристаллы на основе неорганического связующего. Они обладают комплексом конструктивных, механических и технологических преимуществ, а также пожаробезопасностью и экологической чистотой по сравнению с ТИМ на основе пенокерамических составов.

В настоящее время интенсивно разрабатывают ТИМ на основе кварцевых, каолиновых, алюмосиликатных, базальтовых и других видов минеральных волокон, а также нитевидных кристаллов и полых стеклянных микросфер, которые характеризуются высокими температурами применения, малой теплопроводностью и низкой объемной массой. Из широкого спектра волокнистых ТИМ наибольший интерес представляют негорючие и нетоксичные материалы.

Целью данной работы является проведение теплофизических исследований перспективных ТИМ на основе базальтовых волокон и сферопластиков, полученных методом фильтрационного осаждения, для оценки фактических характеристик ТИМ.

В работе решаются следующие задачи:

- разработка технологии получения ТИМ и методики назначения параметров технологического процесса;
- исследование изменения теплового потока на внутренних и внешних поверхностях образцов ТИМ;
- расчет фактических значений теплопроводности ТИМ.

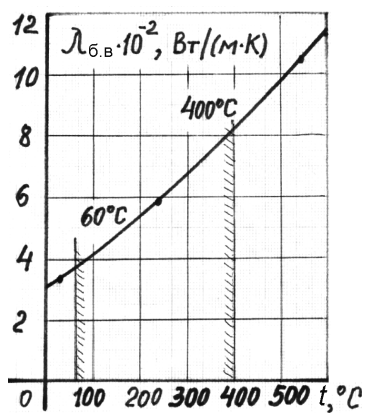


Рис. 1. Зависимость теплопроводности базальтовых волокон от температуры

Описание экспериментов. Для проведения исследований был разработан пористый ТИМ на основе короткого базальтового волокна и связки из Al_2O_3 (5...6 %) в виде коллоидного раствора. При этом использовали базальтовые волокна длиной $l_{б.в} = 1...3$ мм и диаметром $d_{б.в} = 3...10$ мкм, имеющие химический состав, %: SiO_2 — 48...52; Al_2O_3 — 16...18; Fe_2O_3 — 7...11; CO — 7...10;

MgO — 4...8; TiO₂ — 1...2; Na₂O+K₂O = 3...5. Плотность базальтовых волокон $\rho_{\text{б.в.}} = 2700 \text{ кг/м}^3$, теплопроводность $\lambda_{\text{б.в.}}$ в диапазоне температур от 60 до 600 °С изменяется почти линейно (рис. 1) и равна 0,037...0,073 Вт/(м · К) [1], а ее среднее значение составляет 0,055 Вт/(м · К).

Разработанный ТИМ имеет плотность $\rho_{\text{ТИМ}} = 195 \text{ кг/м}^3$, пористость 92 % и прочность при сжатии $\sigma_{\text{сж}}$ (рис. 2), равную 0,43 МПа. Из этого материала методом жидкостной фильтрации (рис. 3) по отработанной технологии [1, 2] были изготовлены кольца (рис. 4) и плитки.

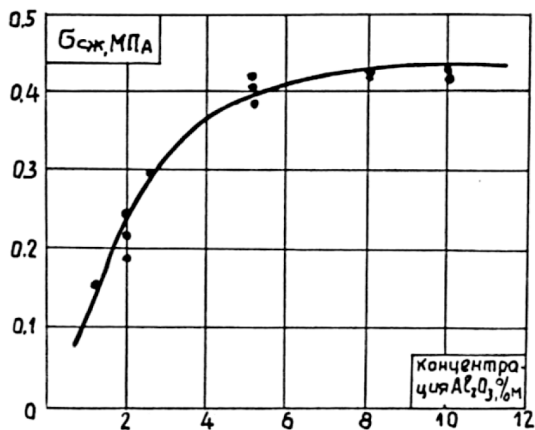


Рис. 2. Зависимость напряжения сжатия $\sigma_{\text{сж}}$ при деформации 10 % в плоскости плитки из базальтовых волокон от массовой концентрации коллоидной связки из Al₂O₃ [1]

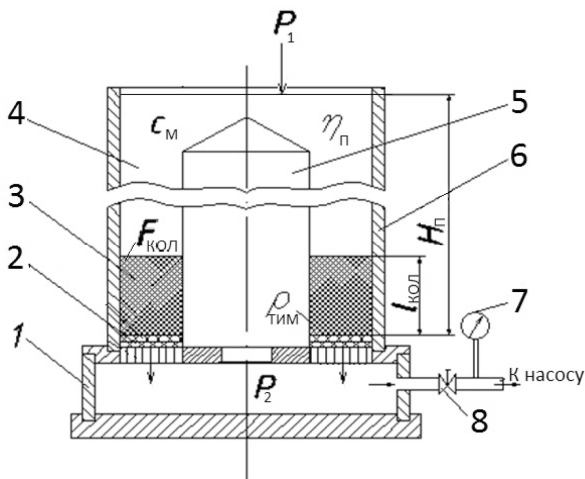


Рис. 3. Схема фильтрационного осаждения пульпы:

1 — камера; 2 — фильтровальная перегородка; 3 — слой осадка ТИМ; 4 — пульпа; 5 — оправка; 6 — корпус (труба); 7 — вакуумметр; 8 — запорный вентиль



Рис. 4. Общий вид колец из ТИМ

Размеры колец выбирали расчетным путем из условия, что при нагреве внутренней стороны до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ температура наружной не должна превышать $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, т. е. перепад температур должен составлять не более $340\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Расчет проводили следующим образом.

1. Определяли среднее значение теплопроводности теплоизоляционных колец из базальтовых волокон в диапазоне температур $60\dots 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ по правилу суммирования:

$$\lambda_{\text{ТИМ}}^{\text{cp}} = \lambda_{\text{б.в}}^{\text{cp}} \vartheta_{\text{б.в}} + \lambda_{\text{возд}}^{\text{cp}} \vartheta_{\text{возд}}, \quad (1)$$

где $\vartheta_{\text{б.в}}$, $\vartheta_{\text{возд}}$ — объемное содержание соответственно волокон и пор (пустот), заполненных воздухом, в ТИМ; $\lambda_{\text{возд}}^{\text{cp}}$ — среднее значение теплопроводности спокойного воздуха.

Теплопроводность воздуха в указанном диапазоне температур изменяется почти линейно (рис. 5): $\lambda_{\text{возд}} = 0,0283\dots 0,0495\text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, а его среднее значение $\lambda_{\text{возд}}^{\text{cp}}$ составляет $0,039\text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Приняв $\lambda_{\text{б.в}}^{\text{cp}} = 0,055\text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ и подставив указанные значения теплопроводности в выражение (1), получим

$$\lambda_{\text{ТИМ}}^{\text{cp}} = 0,0403\text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

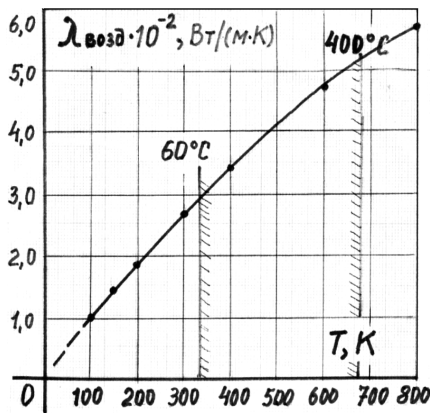


Рис. 5. Зависимость теплопроводности спокойного воздуха от температуры

2. Толщину плиток из базальтовых волокон рассчитывали по значению теплового потока из уравнения Фурье:

$$q = \lambda_{\text{ТИМ}}^{\text{cp}} \Delta t / h_{\text{ТИМ}}, \text{ Вт/м}^2, \quad (2)$$

где $\Delta t = 400 - 60 = 340$ °C — перепад температур по толщине плитки.

3. Толщину стенки колец из базальтовых волокон находили из уравнения

$$q = \frac{2}{d_{\text{вн}}} \frac{\lambda_{\text{ТИМ}}^{\text{cp}} \Delta t}{\ln(d_{\text{вн}}/d_{\text{нар}})}, \text{ Вт/м}^2, \quad (3)$$

где $d_{\text{вн}}$, $d_{\text{нар}}$ — внутренний и наружный диаметры колец. Значение теплового потока задавали исходя из параметров имеющегося для проведения эксперимента оборудования: $q = 800$ Вт/(м·К).

В результате по формулам (2) и (3) получены расчетные значения толщины плитки и толщины стенки кольца: 17,2 и 17,1 мм.

Исходя из расчетных данных имеющегося для эксперимента оборудования, а также при соблюдении коэффициента запаса по теплопроводности $k = 1,4$, были выбраны геометрические параметры колец: внешний диаметр — 110,5 мм; внутренний диаметр — 61,5 мм; толщина — 24,5 мм.

Основные технологические операции при получении колец из ТИМ:

- 1) очистка волокна марки БСТВ (супертонкое волокно);
- 2) измельчение волокон до размеров 1,0...1,5 мм;
- 3) изготовление гидромассы;

- 4) фильтрация в пресс-форме;
- 5) сушка в печи при температуре 160...200 °С;
- 6) отжиг при температуре 500...600 °С.

Теплоизолирующие кольца изготавливали методом фильтрационного осаждения [1] по схеме, представленной на рис. 3. Такая технология обеспечивает низкий уровень теплопроводности — 0,04 Вт/(м·К).

Для реализации технологии получения ТИМ по указанной схеме необходимо определить следующие параметры процесса изготовления колец.

1. Площадь сечения кольца из базальтовых волокон

$$F_{\text{кол}} = \pi (d_{\text{нар}}^2 - d_{\text{вн}}^2) / 4 = \pi (11,05^2 - 6,15^2) / 4 = 66,2 \text{ см}^2.$$

2. Объем кольца из базальтовых волокон

$$V_{\text{кол}} = F_{\text{кол}} l_{\text{кол}} = 638,8 \text{ см}^3.$$

3. Масса кольца, т. е. масса твердого осадка из волокон и связки,

$$M_{\text{кол}} = M_{\text{ТВ}} = F_{\text{кол}} l_{\text{кол}} \rho_{\text{ТИМ}} = 0,124 \text{ кг.}$$

4. Объем пульпы (техническая вода плюс короткие волокна и связка)

$$V_{\text{п}} = F_{\text{кол}} H_{\text{п}} = M_{\text{ТВ}} / C_{\text{м}} = 4,96 \cdot 10^3 \text{ см}^3,$$

где $C_{\text{м}} = 25 \text{ кг/ м}^3$ — массовая концентрация волокна и связки в пульпе.

5. Высота столба пульпы

$$H_{\text{п}} = V_{\text{п}} / F_{\text{кол}} = 0,749 \text{ м.}$$

6. Время фильтрационного осаждения пульпы [3]

$$\tau_{\text{ф}} = \frac{l_{\text{кол}}^2}{2} \frac{\eta_{\text{п}}}{K_{\text{д}} \Delta p} = 15 \text{ мин,}$$

где $\eta_{\text{п}} \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ — динамическая вязкость пульпы; $K_{\text{д}}$ — коэффициент проницаемости Дарси (по данным [3], $K_{\text{д}} = 0,52 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^2$); $\Delta p \approx 50 \text{ кПа}$ — перепад давления на слое осадка 3 и фильтровальной перегородки 2 (см. рис. 3) от действия вакуумного насоса и давления столба жидкости.

Процесс фильтрации можно ускорить в разумных пределах как за счет существенного повышения внешнего давления, так и путем сгущения пульпы.

Для плотного (без зазора) соединения готовых колец из ТИМ между собой с торцевых краев были выполнены тепловые замки.

При проведении исследований параметров ТИМ на основе базальтовых волокон было решено параллельно провести их сравнительный анализ с аналогичным материалом — сферопластиком. Этот материал имеет высокие теплофизические характеристики и также является перспективным для использования в машиностроении, народном хозяйстве, нефтедобыче и т. д. Для колец из ТИМ использовали стеклянные микросферы марки МС-ВП-А9, аппретированные АГМ-9. В качестве связующего применяли эпоксидный компаунд марки ЭТАЛ-245.

Экспериментальное определение теплофизических характеристик ТИМ осуществляли по схеме, представленной на рис. 6.

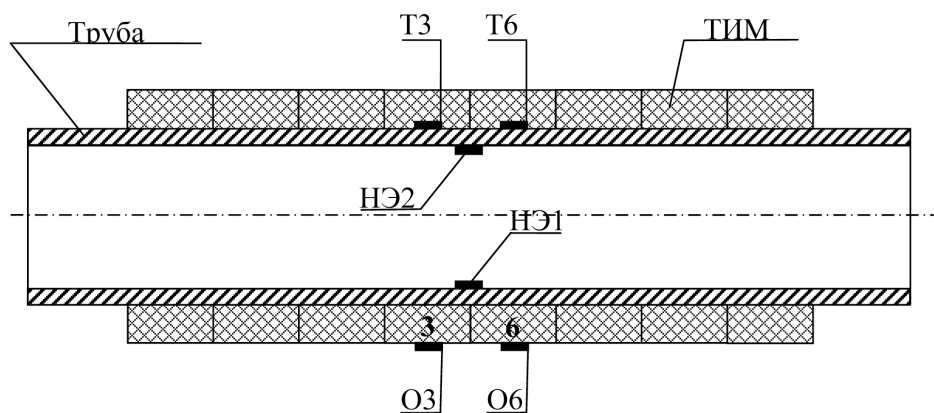


Рис. 6. Схема расположения образцов ТИМ № 3, 6 и установки термодатчиков по длине трубы:

НЭ1, НЭ2 — термопары, расположенные внутри стальной трубы; ТЗ, Т6 — термопары, расположенные на трубе в соответствии с номерами образцов ТИМ; ОЗ, О6 — термопары, расположенные на поверхностях образцов ТИМ № 3, 6 соответственно

Для исследований были выбраны стальная труба (длина — 800 мм, наружный диаметр — 60 мм, толщина — 5,0 мм) и кольцевые секции ТИМ (высота — 120 мм, внешний диаметр — 110,5 мм, толщина — 24,5 мм). При этом образцы различных ТИМ одновременно надевали на трубу, что позволило за один эксперимент исследовать и сравнить два вида материалов.

Тепловые испытания. Подготовка к проведению теплового эксперимента проходила на двух основных участках. Теплоизоляционные кольца на основе базальтовых волокон и сферопластиков изготавливали в лаборатории Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Дмитров Московской обл.), трубы, приборы и технологическую

оснастку — в лаборатории кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва).

Наиболее рациональным было признано горизонтальное расположение трубы, что обеспечивало свободную подводку измерительной аппаратуры с торцев, упрощение сборки стенда и возможность легкой смены различных элементов системы нагрева и измерений.

Нагрев проводился равномерно по внутренней поверхности стальной трубы с помощью теплонагревателя, засыпанного внутри трубы литейным песком.

Вследствие горизонтального расположения трубы, показания снимались с нижней поверхности трубы и колец из ТИМ, определяли температуру внутренней поверхности трубы с нижней и верхней сторон. Нижняя поверхность была выбрана в целях более плотного прилегания стальной трубы, колец из ТИМ и термопар, а также меньшего отвода теплоты.

Исходя из температурных условий работы (400 °С) в качестве нагревательного элемента был применен ТЭН трубчатого типа длинной, близкой к длине трубы. Его размещали строго по осевой линии стальной трубы. Для точного регулирования температуры нагрева использовали два последовательно соединенных реостата.

Исследуемые образцы ТИМ располагали на равном расстоянии от концов трубы исходя из условия минимального влияния краевого эффекта. Для этого дополнительно было теплоизолировано пространство по краям трубы с помощью колец из базальтового волокна и глинозема.

В качестве образцов были взяты ТИМ на основе базальтового волокна и глинозема (образец № 6) и ТИМ на основе стеклянных микросфер и эпоксидного связующего (образец № 3).

Эксперимент проводили в соответствии со схемой на рис. 6. Результаты эксперимента даны в табл. 1.

По данным, представленным в табл. 1, определены значения теплопроводности:

$$\lambda_{\text{ТИМ}} = \frac{q}{2\pi(t_1 - t_2)} \ln \frac{d_{\text{нар}}}{d_{\text{вн}}},$$

где q — удельный тепловой поток, усредненное значение которого из экспериментальных данных равно 145 Вт/м; $d_{\text{вн}}$, $d_{\text{нар}}$ — внутренний и наружный диаметры кольца из ТИМ; t_1 , t_2 — температуры на внутренней и внешней поверхностях колец из ТИМ.

Усредненные экспериментальные характеристики ТИМ приведены в табл. 2.

Изменение показаний термопар с течением времени

Время, мин	Температура, °С					
	Т3	О3	Т6	О6	НЭ1	НЭ2
0	18	18	18	18	29	30
10	45	20	47	21	62	82
20	86	23	89	25	111	136
40	140	31	143	32	162	192
50	172	37	176	38	202	227
60	200	44	205	44	230	254
70	233	53	239	53	264	287
85	269	64	276	64	300	323
100	297	75	304	74	329	350
120	357	106	366	100	389	407

Таблица 2

Усредненные экспериментальные характеристики ТИМ

Номер образца	Теплопроводность $\lambda_{\text{ТИМ}}$, Вт/(м·К)	Плотность, г/см ³
3	0,037	0,43
6	0,04	0,25

Анализ данных табл. 2 показывает, что ТИМ на основе базальтового волокна, как и ТИМ на основе стеклянных микросфер, обладает низкой теплопроводностью — около 0,04 Вт/(м·К). Однако ТИМ на основе базальтового волокна имеет преимущества по массе, что важно при его использовании в ракетостроении, нефтедобыче и т. п. Также этот материал стоек к длительному пребыванию в условиях высоких температур (выше 400 °С). Основное преимущество ТИМ на основе стеклянных микросфер состоит в его конструкционной прочности. Однако при высоких температурах в этом материале появляются трещины, что не позволяет его применять длительно при температуре выше 350 °С. Анализ экспериментальных данных по нагреву этого ТИМ при использовании разных связующих выявил возможность достижения положительного результата и при более высоких температурах.

Выводы. Разработанная технология и методика определения параметров изготовления ТИМ на основе базальтового волокна с использованием метода фильтрационного осаждения позволяют получать из-

деля определенных геометрических размеров. Методика обеспечивает определение геометрических параметров изделия исходя из мощности теплового потока и условий необходимого перепада температур на внутренней и внешней поверхностях образцов ТИМ. Результаты экспериментов показали, что ТИМ на основе базальтового волокна, как и ТИМ на основе стеклянных микросфер и эпоксидного связующего, обладает низкой теплопроводностью, равной 0,04 Вт/(м·К).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимофеев М.П. Разработка и исследование фильтрационной технологии изготовления изделий из волокнистых неорганических материалов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 16 с.
2. Режимы фильтрационного осаждения элементов теплозащиты РКТ / В.А. Тарасов и др. // Полет. – 2007. – № 5 – С. 52–55.
3. Комков М.А., Тарасов В.А. Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 431 с.

Статья поступила в редакцию 19.09.2012