

Функциональные материалы для трубопроводов ядерных энерго-двигательных установок

Р. Н. Ризаханов, М. Н. Полянский, А. А. Бармин, Р. И. Рудштейн

Исследован функциональный материал наружной теплоизоляционной оболочки трубопровода, предназначенного для передачи высокотемпературного газообразного теплоносителя в ядерных установках космических аппаратов. В качестве функционального материала предложено использование экранно-вакуумной теплоизоляции, выполненной из молибденовой фольги. Развита физико-математическая модель, описывающая теплоперенос через слой изолятора, проведено численное параметрическое моделирование трубопровода с изоляцией, получены и проанализированы зависимости основных параметров, характеризующих материал наружной оболочки трубопровода. Подтверждена эффективность применения исследованного материала наружной оболочки в целях обеспечения надежного энергосбережения системы с соответствием предъявляемым требованиям.

Ключевые слова: функциональный материал, высокотемпературный теплоизолятор, экранно-вакуумная теплоизоляция, энергосбережение.

This article describes the study of functional material of external thermal insulation of pipeline intended for transmission of high-temperature gas in nuclear propulsion systems of spacecrafts. It was proposed to use vacuum-shield thermal insulation made of molybdenum foil as the functional material. In the course of the studies a physical and mathematical model was developed describing heat transmission through the insulation layer; numerical and parametric modeling of pipeline with insulation was conducted and relationships of basic parameters characterizing the external insulation material of pipeline were obtained and analysed. The study justified the efficiency of application of the studied external thermal insulation material to ensure reliable energy-saving to the system in accordance with the specified requirements.

Key words: functional material, high-temperature heat insulator, multilayer vacuum insulation, energy saving.

Введение

Расширение масштабов космической деятельности способствует возвращению атомной энергии в космос на новом технологическом уровне, позволяющем создавать ядерные энерго-двигательные установки (ЯЭДУ) большой мощности (от сотен киловатт до мегаватт) и длительным ресурсом. Основными точками приложения новых ЯЭДУ станут экспедиции на Марс, ликвидация астероидно-кометной опасности и удаление отработавших искусственных спутников с геостационарной орбиты. Наиболее полно преимущества атомной энергии реализуются в транспортно-энергетических модулях (ТЭМ) на основе ЯЭДУ, обеспечивающих доставку космического аппарата на высокую рабочую орбиту

или межпланетную траекторию и электропитание целевых и служебных систем [1, 2].

Конструктивная схема ТЭМ на основе ЯЭДУ предусматривает газотурбинное преобразование энергии с использованием теплоносителя с высокой рабочей температурой (до 1500 К) и давлением в несколько десятков атмосфер [1, 3]. При реализации подобной схемы возникает задача обеспечения надежной транспортировки теплоносителя от реакторной установки к турбине с возможно минимальными энергетическими потерями, которые обусловлены, главным образом, тепловым излучением с разогретой до высокой температуры поверхности трубопровода. Конструкция трубопровода состоит из несущей трубы, изготовленной из композитного материала, и ее наружной оболочки,

выполненной из функционального теплоизоляционного материала. Назначением наружной оболочки является обеспечение надежного энергосбережения системы за счет уменьшения потерь энергии на тепловое излучение с поверхности трубопровода в окружающее пространство. К функциональному материалу наружной оболочки трубопровода предъявляются требования сверхнизкой теплопроводности и достаточной стойкости к термоудару.

Требуемым уровнем плотности теплового потока, уходящего с наружной поверхности трубопровода, является значение, не превышающее 10 кВт/м^2 при температуре несущей трубы 1500 К .

Среди известных способов теплоизоляции трубопроводов при высоких температурах [4], применение металлической экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ) выгодно отличается простотой, низким значением эффективного коэффициента теплопроводности и высокой технологичностью при малых массо-габаритных параметрах [4, 5]. Этими обстоятельствами объясняется выбор в настоящей работе экранного изолятора из тугоплавкого металла в качестве функционального материала, наиболее подходящего для применения в термонагруженных узлах ракетно-космической техники.

Цель работы — расчет характеристик ЭВТИ, обеспечивающей перепад температуры от 1500 К несущей трубы до 650 К на внешней поверхности, с учетом характерных механизмов теплопередачи — излучения и теплопроводности [6], а также подтверждение эффективности применения исследованного материала наружной оболочки.

Физическая модель экранно-вакуумной теплоизоляции

Высокотемпературная ЭВТИ представляет собой слоистую конструкцию, выполненную из молиб-

деновой фольги. Промежутки между слоями может заполнять газ, соответствующий по параметрам сопутствующей газовой атмосфере космического аппарата. Технологически разделение слоев с цилиндрической геометрией можно получить нанесением на фольговую ленту механическим путем матрицы конусообразных выступов, высота которых задает межслойное расстояние.

С целью определения параметров ЭВТИ на основании работ [7, 8] развита физико-математическая модель, описывающая теплоперенос через слой изоляции.

На рис. 1 представлена схема ЭВТИ, состоящая из n молибденовых экранов. Рис. 1а иллюстрирует поперечное сечение трубопровода с теплоизолирующей наружной оболочкой 1 и несущей трубой 2, полость 3 которой заполнена газом-теплоносителем.

Рис. 1б схематично отражает расположение экранов ЭВТИ, где $0, 1, i, n$ — порядковые номера экранов, а индексы l и k обозначают соответственно внутреннюю и наружную поверхности i -го цилиндрического экрана. За экран с номером $i = 0$ принята внешняя поверхность несущей трубы.

В основе модели лежит система уравнений, каждое из которых описывает поток энергии от i -го к $(i + 1)$ -му экрану с учетом как радиационной, так и кондуктивной составляющих:

$$\frac{1}{\frac{1}{\epsilon_{i,l}} + \frac{A_{i,l}}{A_{i+1,k}} \left(\frac{1}{\epsilon_{i+1,k}} - 1 \right)} \sigma A_{i,l} (T_i^4 - T_{i+1}^4) + q_{gas} + q_{pad} = \sigma A_{n,l} \epsilon_{n,l} T_n^4, \quad i = 0 \dots (n-1), \quad (1)$$

где $A_{i,l}$, $A_{i,k}$ и $\epsilon_{i,l}$, $\epsilon_{i,k}$ — площади и коэффициенты черноты внутренней и наружной поверхности i -го экрана соответственно; T_i — температура i -го экрана; σ — постоянная Стефана – Больцмана; q_{gas} —

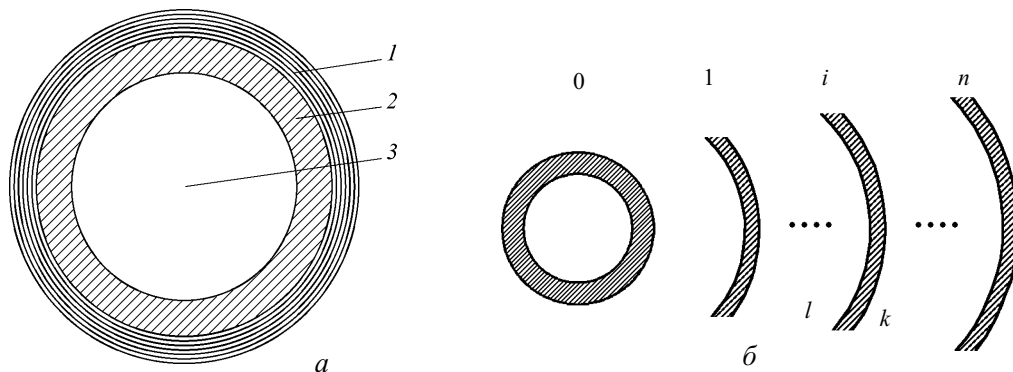


Рис. 1. Схема ЭВТИ. а — поперечное сечение трубопровода: 1 — наружная оболочка, 2 — несущая труба, 3 — “просвет” трубопровода; б — схематичное обозначение экранов: 0, 1, i, n — порядковые номера экранов; индексы l и k обозначают соответственно внутреннюю и наружную поверхности i -го цилиндрического экрана.

составляющая теплового потока, обусловленная теплопроводностью остаточного газа между экранами; q_{pad} — составляющая теплового потока, связанная с теплопередачей посредством конусообразных выступов или иных специальных разделительных прокладок между экранами. Конкретный вид температурной зависимости q_{gas} для цилиндрической геометрии в (1) определяется давлением и химическим составом газовой смеси [9], а вид слагаемого q_{pad} определяется в основном геометрией и материалом выступов (либо структурой и материалом разделительных прокладок) и может быть оценен теоретически [9] или экспериментально [10].

Решение системы (1) в частном случае пренебрежения влиянием остаточного газа и разделительных прокладок — вакуумном случае — может быть получено аналитически. Если же такое пренебрежение недопустимо, то данная нелинейная система имеет лишь численное решение.

Результаты исследований и их обсуждение

Посредством вышеописанной модели проведено численное моделирование трубопровода с ЭВТИ при условиях, представленных в таблице.

Целями расчетов являются: 1) определение количества экранов ЭВТИ, необходимого для поддер-

жания заданной внешней температуры трубопровода; 2) получение распределения температуры по экранам при варьировании давления остаточного газа в межэкранных промежутках; 3) выявление зависимости удельной мощности излучения, уходящего с наружной поверхности трубопровода, от количества экранов; 4) исследование изменения эффективного коэффициента теплопроводности изоляции с увеличением количества экранов.

Эффективным коэффициентом теплопроводности ЭВТИ, состоящей из n экранов, в данной работе считается величина λ_n^{eff} , равная коэффициенту теплопроводности эквивалентного теплоизолятора, выполненного из слоя сплошного материала той же толщины. В цилиндрической геометрии она может быть выражена как

$$\lambda_n^{eff} = \frac{Q \ln \left(1 + \frac{n\Delta r}{r_{тр}} \right)}{2\pi(T_{тр} - T_H)}, \quad (2)$$

где Δr — сумма ширины межэкранных промежутка и толщины экрана, Q — погонная мощность теплового потока (приходящая на единицу длины трубопровода).

Как следует из теории [9], для случая достаточно разреженного газа, когда длина свободного пробега молекул значительно превышает расстояние между теплообменивающимися поверхностями, характерна пропорциональная зависимость теплопроводности межэкранный газа от давления. Это приводит к достижению нижнего предела насыщения эффективной теплопроводности ЭВТИ с уменьшением давления, что обусловлено перераспределением вкладов кондуктивного и излучательного механизмов теплопереноса в пользу излучательной составляющей. С переходом в область достаточно высоких давлений теплопроводность газа достигает своего верхнего предела насыщения, сохраняя постоянное значение, практически не зависящее от давления. При этом суммарный вклад механизмов переноса тепла в ЭВТИ также не зависит от давления. Следовательно, результирующая (эффективная) теплопроводность ЭВТИ в указанном диапазоне давлений практически постоянна.

Результаты, полученные численным моделированием, полностью подтверждают данные положения (рис. 2–4).

На рис. 2 приведены зависимости температуры наружной поверхности ЭВТИ T_H (рис. 2а) и погонной мощности излучаемого наружной поверхностью ЭВТИ теплового потока Q (рис. 2б) от количества экранов n при различных давлениях остаточного газа.

Таблица

Значения характерных параметров при расчете трубопровода с ЭВТИ	
Наружный радиус несущей трубы (0-го экрана), $r_{тр}$, мм	50
Температура наружной поверхности несущей трубы, $T_{тр}$, К	1500
Температура внешней поверхности ЭВТИ, T_H , К	650
Материал экранов	Молибден
Коэффициент черноты внутренней поверхности 0-го экрана, $\epsilon_{0,i}(T, K)$	0,32
Коэффициент черноты внутренней поверхности i -го экрана $\epsilon_{i,i}(T, K)$, $i = 1 \dots n - 1$	0,017(300); 0,03(500); 0,043(600); 0,055(700); 0,068(800); 0,08(900); 0,093(1000); 0,105(1100); 0,117(1200); 0,142(1400); 0,166(1600) [11]
Коэффициент черноты наружной поверхности i -го экрана $\epsilon_{i,k}(T, K)$, $i = 1 \dots n - 1$	0,2
Коэффициент черноты наружной поверхности n -го экрана, $\epsilon_{n,k}(T, K)$	0,2
Расстояние между экранами, мкм	160
Толщина экранов, мкм	50
Остаточный газ	Воздух

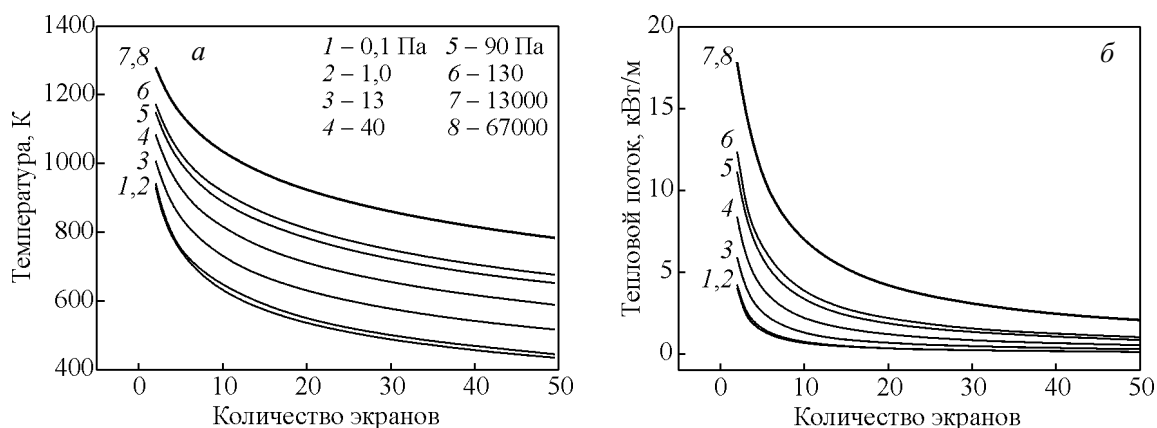


Рис. 2. Зависимость температуры наружной поверхности ЭВТИ T_n (а) и погонной мощности излучаемого ею теплового потока Q (б) от количества экранов n при различных давлениях остаточного газа ($T_{тр} = 1500$ К).

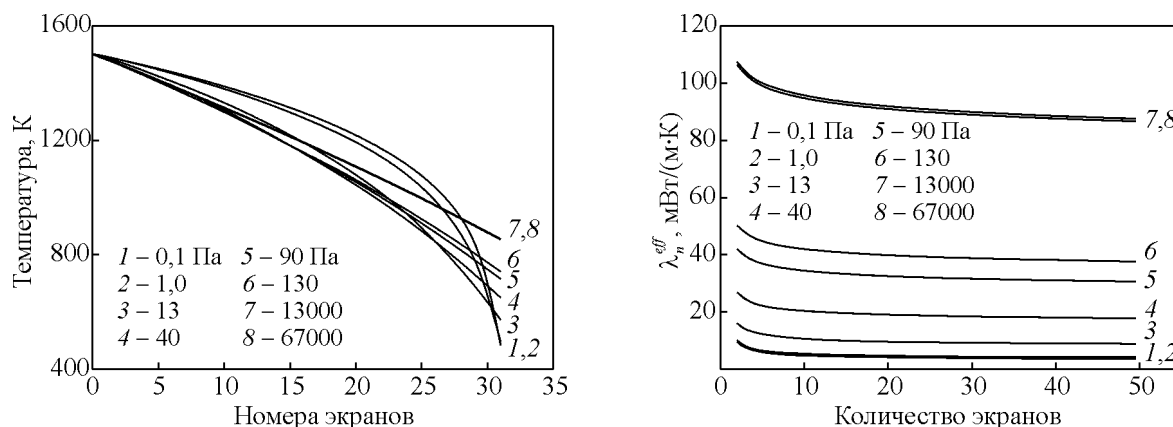


Рис. 3. Распределение температуры T по i экранам при различных давлениях остаточного газа.

Рис. 4. Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности λ_n^{eff} (2) ЭВТИ от количества экранов n при различных давлениях остаточного газа.

Как видно из рис. 2а, при давлении остаточного газа на уровне 13 Па структура ЭВТИ должна включать в себя 20 экранов для обеспечения соответствия поставленным требованиям. При этом погонная мощность излучения, согласно рис. 2б, равна 0,65 кВт/м.

Изменение соотношения вкладов кондуктивного и излучательного механизмов теплопереноса хорошо отражает рис. 3, иллюстрирующий распределение температуры по экранам при различных давлениях остаточного газа. С ростом давления крутизна кривых температурного распределения уменьшается.

Как следует из рис. 4, эффективный коэффициент теплопроводности ЭВТИ в значительной степени определяется давлением остаточного газа. При давлении 13 Па его значение составляет 9,6 мВт/(м·К). Небольшое снижение эффективного коэффициента теплопроводности с уменьшением количества экранов показывает, что добавление дополнительного экрана к структуре ЭВТИ оказывается более “вы-

годным” в сравнении с таким же утолщением слоя эквивалентного теплоизолятора из сплошного материала.

Достижение верхнего предела насыщения на всех представленных графиках проявляется в слиянии кривых 7, 8, соответствующих давлениям $1,3 \cdot 10^4$ и $6,7 \cdot 10^4$ Па. Нижним пределом насыщения можно считать кривые 1 и 2, соответствующие давлениям 0,1 и 1 Па.

Выводы

1. Развита физико-математическая модель, описывающая распространение теплового потока через слой ЭВТИ и позволяющая определить ее основные теплофизические характеристики.

2. Проведено численное параметрическое моделирование трубопровода с ЭВТИ, позволившее получить зависимости теплового потока с наружной

поверхности и эффективного коэффициента теплопроводности от количества экранов в слое изоляции при различных давлениях остаточного газа, а также распределение температуры по экранам ЭВТИ.

3. Подтверждена возможность использования молибденового экранного теплоизолятора в качестве функционального материала наружной оболочки высокотемпературной теплоизоляции трубопровода с обеспечением температуры несущей трубы 1500 К и температуры наружной поверхности трубопровода на уровне 650 К.

4. Показано, что при остаточном давлении 13 Па для решения поставленной задачи применима изоляция, состоящая из 20-и экранов; при этом погонная мощность теплового потока, уходящего с наружной поверхности ЭВТИ, будет иметь значение на уровне 650 Вт/м (1,9 кВт/м²), что соответствует температуре наружной поверхности около 630 К; при этом эффективный коэффициент теплопроводности изоляции составит 9,6 мВт/(м·К).

Литература

1. Коротеев А.С. Новый этап космической энергетики. Вестник РАН, 2012, т. 82, № 4, с. 317 – 322.
2. Васильковский В.С. Ядерная энергетика в космосе. Аэрокосмический курьер, 2002, № 4, 5.
3. Коротеев А.С., Гафаров А.А., Сметанников В.П. и др. Опыт создания и основные направления развития и применения космической ядерной энергетики в России. Бюллетень по атомной энергии. 2003, № 9, с. 51 – 57, № 10, с. 31 – 36.
4. Glass D.E., Dirling R., Croop H., Fry T. J., Frank G.J. Materials development for hypersonic flight vehicles, 14th AIAA/AHI International Space Planes and Hypersonics Systems and Technologies Conference: a Collection of Technical Papers; v. 3; p. 2162 – 2175; Canberra; 6 – 9 Nov. 2006; Australia, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
5. Miller S.D. High temperature multi-layer insulation development. Final Technical Report, UDRI Contract No. RSC-04019, S.D. Miller & Associates Research Foundation (SMARF), Flagstaff, AZ, 29 March 2006.
6. Бондаренко Г.Г., Кокин М.А., Пятых Д.С., Якушкин М.М.. Спектральный анализ термоволновых колебаний в слоистых системах. Перспективные материалы, 2011, № 5, с. 91 – 94.
7. Daryabeigi K., Miller S. D., Cunnington G. R. Heat Transfer in high temperature multilayer insulation. Proceedings of the 5th European Workshop Thermal Protection Systems and Hot Structures: 17 – 19 May 2006, Noordwijk, The Netherlands, ESA Publications Division, 2006.
8. Marschall, J., Maddren, J., and Parks, J., “Internal Radiation Transport and Effective Thermal Conductivity of Fibrous Ceramic Insulation”, Proceedings of 35th AIAA Thermophysics Conference, June 11 – 14, 2001/ Anaheim, CA; American Inst. of Aeronautics and Astronautics, 2001.
9. Каганер М.Г. Тепловая изоляция в технике низких температур. М.: Машиностроение, 1966, 275 с.
10. Киселев Г.А., С.М. Куц, В.Е. Шапкин. Высокотемпературная экранно-вакуумная теплоизоляция. Теплофизика высоких температур, 1975, т. 14, № 3, с. 670 – 673.
11. Физические величины: Справочник; А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др.; Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991, 1232 с.

Статья поступила в редакцию 20.02.2013 г.

Ризаханов Раждун Насрединович — ГНЦ РФ ФГУП “Исследовательский Центр им.М.В. Келдыша”, кандидат физико-математических наук, начальник “Центра по применению нанотехнологий в энергетике и электроснабжении космических систем”. Специалист в области нанотехнологий. E-mail: nanocentre@kerc.msk.ru, rn_rizakhanov@kerc.msk.ru.

Полянский Михаил Николаевич — ГНЦ РФ ФГУП “Исследовательский Центр им.М.В. Келдыша”, кандидат технических наук, заместитель начальника “Центра по применению нанотехнологий в энергетике и электроснабжении космических систем”. E-mail: nanocentre@kerc.msk.ru.

Бармин Александр Александрович — ГНЦ РФ ФГУП “Исследовательский Центр им. М.В. Келдыша”, кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Специалист в области нанотехнологий. E-mail: nanocentre@kerc.msk.ru.

Рудштейн Роман Ильич — ГНЦ РФ ФГУП “Исследовательский Центр им. М.В. Келдыша”, инженер; Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета Высшая школа экономики, аспирант. Специалист в области нанотехнологий. E-mail: rudshtein@gmail.com.