

УДК 536; (015).002; 620.2(15)

В.Л. Драгун, М.С. Третьяк, В.В. Торопов, В.В. Чупрасов

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Рассматриваются экспериментальные стенды, созданные в Институте тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси для изучения поведения и свойств теплозащитных материалов в условиях интенсивных тепловых нагрузок. Приводятся некоторые результаты исследования теплопроводности перспективных теплозащитных материалов в диапазоне температур от 300 до 1800 К.

Введение

Научное направление Института тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ИТМО) было определено его основателем – академиком А.В. Лыковым – и предусматривало теоретические и экспериментальные исследования процессов тепло- и массообмена в капиллярно-пористых телах, дисперсных системах, реологических средах, аэротермооптических устройствах и генераторах низкотемпературной плазмы. Учитывая важность проблем взаимодействия высокотемпературных плазменных и газовых потоков с веществом, изучения поведения конструкционных материалов в таких условиях и создания материалов, выдерживающих колоссальные тепловые нагрузки, в 1969 г. в институте была образована лаборатория теплозащиты. Ее первым заведующим был избран кандидат технических наук Ф.Б. Юревич.

Научная тематика новой лаборатории была тесно связана с развитием авиационной и ракетно-космической техники. Совместные исследования в рамках государственных программ и договоров проводились с основными разработчиками ракетно-космических систем, конструкторскими организациями и головными научно-исследовательскими институтами СССР, а в настоящее время работы выполняются в сотрудничестве с предприятиями ракетно-космического комплекса Российской Федерации.

Несмотря на то, что за прошедшие годы с начала использования ракетно-космической техники практически решена задача входа летательных аппаратов в атмосферу Земли, проблема тепловой защиты (ТЗ) конструкции корабля или головной части ракеты не потеряла своей актуальности и сегодня. Во-первых, появляются новые научно-технические задачи; во-вторых, развитие химии органических и неорганических соединений, промышленное освоение получения новых веществ приводят к созданию на их основе новых композиционных теплозащитных материалов (ТЗМ), обладающих рядом преимуществ по сравнению с уже существующими как в теплозащитном, так и в технологическом плане. Исследование новых материалов и технологий позволяет уменьшить удельный вес ТЗ в конструкции спускаемого объекта, например, при спуске космических объектов в атмосфере других планет.

В качестве основного метода ТЗ в конструкциях пилотируемых аппаратов, головных частей баллистических ракет дальнего действия используется способ защиты с помощью разрушающихся ТЗ-материалов. В процессе защиты объектов такими материалами происходит абляция поверхностной части ТЗМ под воздействием высоких конвективных и радиационных тепловых потоков, при этом сохраняются более глубокие слои материалов. Этот метод эффективен и надежен. Однако ТЗ имеет значительный вес, а если учесть, что это «лишний» вес, то понятна важность его снижения в конструкции летательного аппарата [1–3].

Разрушение ТЗМ является результатом сложных физико-химических процессов при воздействии конвективных и лучистых тепловых потоков и диффузионных потоков вещества в пограничном слое. Большую роль в разрушении играют силы давления и трения на поверхности; внутреннее давление газообразных продуктов, образующихся при деструкции связующего; термические напряжения, возникающие при разогреве теплозащитной конструкции, и т. д. При

прогреве сложного композиционного материала химические реакции идут как в самом материале, так и на разрушающейся поверхности с участием компонентов набегающего потока.

Окончательной проверкой метода расчета ТЗ является летный эксперимент, который позволяет определить суммарные характеристики уноса массы и прогрева покрытия для конкретного изделия и траектории входа, но результаты летных испытаний трудно распространить на условия работы ТЗ изделий с другими тепловыми нагрузками при спуске в атмосферу. Это связано с низкой точностью определения в полетных условиях параметров теплообмена и характеристик уноса массы материалов по сравнению с точностью определения этих параметров в условиях испытания ТЗМ на стенде.

1. Экспериментальные стенды

Недостаток информации о поведении материала в широком диапазоне изменения внешних условий и высокая стоимость летного эксперимента ограничивают его возможности в исследовании разрушения ТЗМ. Поэтому экспериментальным исследованиям разрушения ТЗМ в условиях, имитирующих натурные, уделяется большое внимание. Данные, полученные при изменении в широком диапазоне внешних условий, позволяют оценить точность расчета параметров уноса массы по существующим методикам, что, в свою очередь, способствует совершенствованию методик расчета и созданию оптимальной конструкции ТЗ. Опыт экспериментальных исследований показывает, что моделировать одновременно все воздействующие факторы невозможно. В связи с этим ставится задача выявления зависимости параметров уноса ТЗМ от отдельных факторов внешнего воздействия и в лабораторных условиях материал тестируется на многих стендах.

С начала 60-х гг. прошлого века в ИТМО проводится ряд научно-исследовательских работ по изучению материалов для создания ТЗ спускаемых аппаратов, который включает:

– разработку и создание устройств, в данном случае плазмотронов, для получения потоков газа с параметрами, моделирующими натурные условия траектории спуска конкретного аппарата или головной части;

– экспериментальную и расчетную диагностику (газодинамическую, оптическую) получаемых плазменных потоков газа и диагностику взаимодействия этих потоков с твердым телом;

– разработку методик проведения исследований и испытаний ТЗМ различных классов, оценку полученных результатов и выдачу рекомендаций по улучшению теплозащитных свойств материалов.

Существующие методики расчета позволяют прогнозировать свойства разрабатываемых ТЗМ, а также оценивать их работоспособность в условиях заданных тепловых нагрузок. На практике основным методом получения наиболее достоверных данных является экспериментальное исследование разрушения материала в высокотемпературном газовом потоке с заданными параметрами. Ценность получаемой при этом информации возрастает по мере приближения условий экспериментального исследования к натурным. Чтобы приблизить стендовые испытания к натурным условиям работы материала в части состава рабочей среды, тепловых и газодинамических параметров, в ИТМО создан ряд стендов на базе электродуговых нагревателей газа (плазмотронов) [4].

Установка мощностью 1000–1500 кВт позволяет проводить исследования ТЗМ при совместном воздействии конвективных и радиационных тепловых потоков, а также при наличии в газовом потоке твердых или расплавленных частиц при давлении торможения 1–20 атм и энтальпии 8,5–40 МДж/кг (рис. 1).

Для проведения сравнительных испытаний сопловых вкладышей из различных теплозащитных материалов при температурах 3000–5000 К, высоких скоростях и давлениях торможения газового потока создан экспериментальный стенд на базе коаксиального электродугового нагревателя газа (рис. 2).

По программе ИНТАС создан стенд радиационного нагрева для определения теплопроводности теплозащитных материалов при температурах до 1500 К (рис. 3).

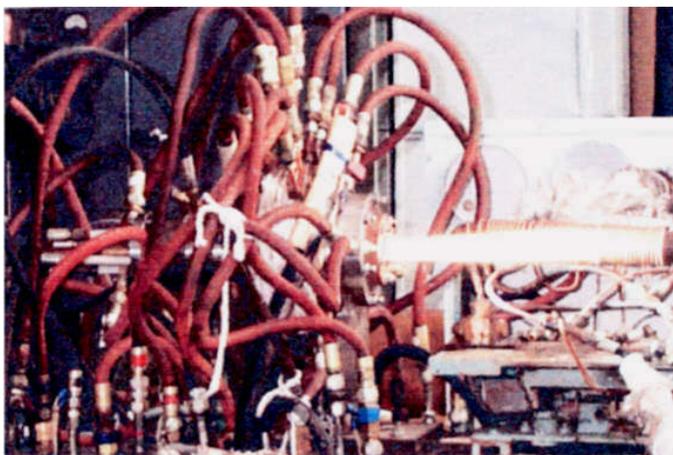


Рис. 2. Общий вид нагревателя газа коаксиальной схемы



Рис. 3. Стенд радиационного нагрева

При создании энергетических устройств для космической техники в ряде случаев необходимо решать задачу внутренней тепловой защиты конструктивных элементов. Для ее экспериментальной отработки создан стенд на базе линейного плазмотрона с торцевым электродом (рис. 4), обеспечивающий тепловую нагрузку на исследуемый материал (образцы в виде полых цилиндров) токонесущей плазмой дугового разряда. На данном стенде выполнен ряд исследований, связанных с неразрушающейся тепловой защитой (пористыми стенками с транспирационным охлаждением), проведены испытания ряда аблирующих материалов применительно к тепловой защите конструктивных элементов энергетических установок.

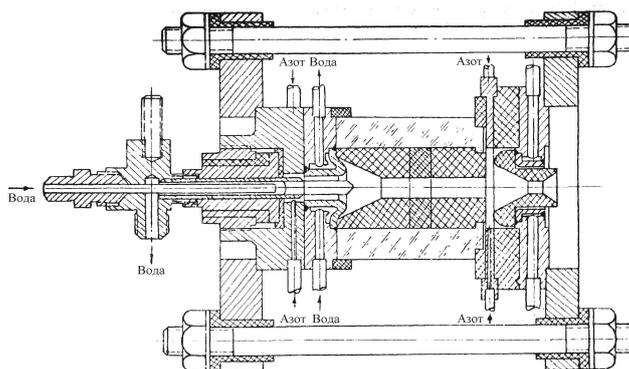


Рис. 4. Схема линейного плазмотрона с торцевым электродом

Созданный в ИТМО в сотрудничестве с Российской корпорацией «Энергия» ускоритель используется для моделирования условий аэродинамического нагрева, возникающего при полете космического аппарата в атмосфере Земли и других планет.

2. Важнейшие результаты научных исследований

За прошедшие годы сотрудниками лаборатории выполнен ряд важных научных и прикладных работ, результаты которых позволили ей занять достойное место среди научных кол-

лективов бывшего СССР. Эти результаты получены в процессе изучения радиационно-конвективного теплообмена при гиперзвуковом обтекании осесимметричных затупленных тел (кандидаты наук Ф.Б. Юревич, М.Н. Ролин, Л.А. Конюх), создания новых типов и конструкций плазмотронов (кандидаты наук Л.И. Шараховский, В.В. Торопов, Н.А. Костин), в ходе решения стационарных и нестационарных задач теплообмена при взаимодействии плазменных потоков с поверхностью аблирующих материалов (кандидаты наук И.И. Зедлец, О.П. Иванов, Г.А. Сурков, В.Л. Сергеев, В.В. Чупрасов), при исследовании кинетики многостадийных процессов термического разложения композиционных материалов и их тепловых свойств (кандидаты наук А.Е. Венгер, Ю.Е. Фрайман) и изучении работоспособности и тепловой защиты стенок с транспирационным охлаждением высокоэнергетических установок (кандидаты наук С.М. Аринкин, М.С. Третьяк, В.С. Куликов).

По исследованию процессов лучистого переноса (кандидат наук Г.М. Яцкевич) и физической гидродинамики низкотемпературной плазмы (кандидат наук В.Л. Сергеев) проводились работы с Нью-Йоркским университетом Стоуни-Брук и Институтом термомеханики Чехословацкой академии наук.

Большой творческий вклад в решение стоящих перед лабораторией теплозащиты ИТМО задач внесли сотрудники Ю.И. Костников, В.С. Ермаченко, А.П. Искренков, В.В. Мазак, А.А. Присмотров, В.Г. Самусевич, В.И. Гулякевич и др.

В последнее время на уникальных стендах лаборатории выполнялись работы по международным программам, связанные с изучением разрушения метеороидов в атмосфере Земли и исследованием теплопроводности волокнистых материалов различной плотности на основе SiO_2 и Al_2O_3 , а также ячеистых материалов из Мо с высокой пористостью в диапазоне температур от 293 до 2293 К [5]. На рис. 5 показаны результаты исследований, выполненных совместно с техническим университетом им. Баумана (Москва, Россия) при поддержке ИНТАС.

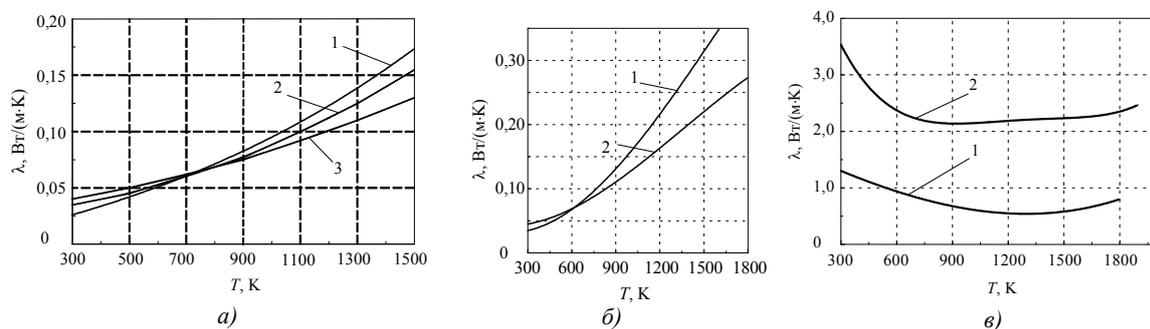


Рис. 5. Зависимость эффективной теплопроводности высокопористого волокнистого материала от температуры: а) на основе SiO_2 : 1 – $\rho = 90 \text{ кг/м}^3$; 2 – 105 кг/м^3 ; 3 – 120 кг/м^3 ; б) Al_2O_3 : 1 – $\rho = 79 \text{ кг/м}^3$; 2 – 113 кг/м^3 ; в) Мо: 1 – $\rho = 300 \text{ кг/м}^3$; 2 – 800 кг/м^3

Из рис. 5 можно видеть, что для волокнистых материалов эффективная теплопроводность возрастает с температурой. Вполне естественно, что для таких высокопористых материалов основной вклад в эффективную теплопроводность при высоких температурах дает радиационная составляющая. Косвенно это подтверждается тем, что полученные зависимости хорошо аппроксимируются кубическим полиномом по температуре. Интересным является тот факт, что при температуре выше 700 К теплопроводность материалов на основе SiO_2 с меньшей плотностью растет быстрее (см. рис. 5, а).

Эффективная теплопроводность ячеистого материала на основе Мо ведет себя немонотонным образом. По-видимому, такое поведение является следствием конкуренции двух процессов – кондуктивного теплопереноса по твердому каркасу материала и радиационного теплопереноса по поровому пространству.

За время существования лаборатории ее сотрудниками опубликовано 7 монографий, свыше 400 статей, сделано около 150 докладов на различных международных, всесоюзных и республиканских форумах ученых, получено больше 50 авторских свидетельств и патентов на изобретение. Замечательным, поистине эпохальным явлением в мировой научной литературе

явился выход в свет монографии Ю.В. Полежаева (ныне члена-корреспондента РАН) и Ф.Б. Юревича «Тепловая защита».

Большое внимание уделялось подготовке научных кадров: сотрудниками лаборатории защищено 14 кандидатских диссертаций и ее бывшим заведующим Ф.Б. Юревичем подготовлена докторская диссертация.

В начале 1990-х гг. с переходом в ИТМО лаборатории из НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ и ее объединением с лабораторией теплозащиты была создана крупная и оригинальная лаборатория радиационной газовой динамики. Ее сотрудники, лауреаты Государственной премии Республики Беларусь, кандидаты наук Г.С. Романов и Ю.А. Станкевич, а также кандидаты наук К.Л. Степанов, Л.К. Станчиц, А.С. Сметанников и другие, выполняли теоретические исследования процессов взаимодействия мощного лазерного излучения с различными материалами, создали банки оптических и теплофизических свойств горячих газов и плазмы, разработали и широко использовали вычислительные методы для описания сложных радиационно-газодинамических процессов, сопровождающих действие потоков энергии различной физической природы на вещество.

Заключение

В ИТМО создан комплекс экспериментальных стендов, позволяющих моделировать натурные условия работы теплозащитных материалов. Проведены исследования в широком диапазоне изменения тепловых и аэродинамических параметров различных классов (типов) аблирующих материалов: графитов, углерод-углеродных композиций, угле-, стекло-, органопластиков, полимеров, легковесных материалов и других, даны рекомендации по их применению. В процессе проведения лабораторных исследований выявлено, что при изготовлении и эксплуатации натуральных изделий особое внимание необходимо уделять местам соединения отдельных элементов теплозащитного покрытия, так как незначительные дефекты приводят к разогреву контактирующих поверхностей и повышению эрозии материала (краевой эффект).

Что касается разработки и создания плазмотронов для получения высокотемпературных скоростных потоков различных газов, то такие установки были созданы не только для внутреннего пользования – уникальные установки были поставлены в ведущие организации оборонного комплекса СССР.

Список литературы

1. Полежаев, Ю.В. Тепловая защита / Ю.В. Полежаев, Ф.Б. Юревич. – М.: Энергия, 1976. – 391 с.
2. Полежаев, Ю.В. Тепловое разрушение материалов / Ю.В. Полежаев, Г.А. Фролов. – Киев: ИПМ НАНУ, 2005. – 288 с.
3. Никитин, П.В. Тепловая защита / П.В. Никитин. – М.: МАИ, 2006. – 512 с.
4. Третьяк, М.С. К вопросу исследования теплозащитных покрытий для ракетно-космических изделий / М.С. Третьяк, В.В. Торопов, В.В. Чупрасов // Материалы Первого Белорусского космического конгресса, 28–30 октября 2003 г., Минск. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2003. – С. 34–37.
5. Исследование эффективной теплопроводности перспективных материалов тепловой защиты / С.В. Резник [и др.] // Тр. Третьей Междунар. конф. «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий», 13–17 сентября 2004 г., пос. Кацевели, Украина. – Киев: Академперіодика, 2004. – С. 7–8.

Поступила 19.07.07

*Институт тепло- и массообмена
им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,
Минск, ул. П. Бровки, 15*

e-mail: lof@hmti.ac.by

V.L. Dragun, M.S. Tretjak, V.V. Toropov, V.V. Chuprasov

**RESEARCH OF SERVICEABILITY AND HEAT-SHIELDING PROPERTIES
OF COVERINGS FOR SPACE-ROCKET PRODUCTS**

The experimental stands created in the Heat and Mass Transfer Institute to study the behaviour and properties of heat-shielding materials in the conditions of intensive thermal loadings are described. Some results of the research of heat conductivity of perspective heat-shielding materials in a range of temperatures from 300 up to 1800 K are given.