

На правах рукописи

Товстоног Валерий Алексеевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ ИССЛЕДОВАНИЙ
ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА И ТЕРМИЧЕСКОГО
РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ
И ПОЛУПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ
ПРИ ДЕЙСТВИИ ИЗЛУЧЕНИЯ**

01.04.14 — Теплофизика и теоретическая теплотехника

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**



Москва – 2009

2

Работа выполнена в Московском государственном техническом
университете имени Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты:

член-корреспондент РАН,
доктор технических наук, профессор Ю.В. Полежаев

член-корреспондент РАН,
доктор физ.-мат. наук, профессор С.Т. Суржиков

доктор технических наук Л.И. Волкова

Ведущая организация — ОАО «Центральный НИИ специального
машиностроения»



Защита состоится 17 февраля 2010 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета Д212.141.08 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Лефортовская наб., д. 1, корп. «Энергомашиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просьба направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана. Ученому секретарю диссертационного совета Д212.141.08.

Автореферат разослан “___” _____ 200 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

В.В. Перевезенцев

Сер. коп.

1001

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Исследования реакции материалов и конструкций на воздействие высокоинтенсивных тепловых потоков — важная часть проектирования современных летательных аппаратов, энергетических установок, высокопроизводительных технологических процессов и т.п.; они важны также при анализе и прогнозировании возможных последствий природных и техногенных катастроф и аварий, сопровождающихся высокоэнергетическим воздействием на окружающую среду и объекты, вызывающим изменение состояния объекта (под состоянием понимается комплекс свойств, характеристик и отличительных признаков объекта — физико-химических, геометрической формы и т.п.). Один из наиболее распространенных видов энергопередачи в природе, технике и технологии — передача энергии излучением УФ-, видимого и ИК-диапазонов спектра, а диапазон возможных значений плотности потока излучения при работе некоторых технических устройств и в процессах в природной среде исключительно широк и характеризуется следующими величинами:

Высокоскоростные летательные и спускаемые аппараты	$q_R \approx 10^3 \dots 10^5 \text{ кВт/м}^2$
Энергетические и технологические установки	$q_R \approx 5 \dots 10^4 \text{ кВт/м}^2$
Тепловые испытания материалов и конструкций с использованием источников излучения	
гелиоустановки	$q_R \approx (1,5 \dots 3) \cdot 10^4 \text{ кВт/м}^2$
лампы накаливания	$q_R \approx (0,1 \dots 1) \cdot 10^3 \text{ кВт/м}^2$
газоразрядные лампы (непрерывный режим)	$q_R \approx (0,5 \dots 5) \cdot 10^3 \text{ кВт/м}^2$
газоразрядные лампы (импульсный режим)	$q_R \approx (0,5 \dots 2) \cdot 10^4 \text{ кВт/м}^2$
квантовые генераторы	$q_R > 10^6 \text{ кВт/м}^2$
Природные катастрофы и техногенные аварии, сопровождаемые массивными пожарами	$q_R \approx (1 \dots 15) \cdot 10 \text{ кВт/м}^2$
Процессы в природной среде и биологических объектах	$q_R \approx 0,1 \text{ кВт/м}^2$

Основная особенность — дальнедействующий характер воздействия излучения — имеет как положительные (например, в технологических процессах обработки материалов или в медицине, когда необходимо локализовать тепловое воздействие на малой площади), так и отрицательные стороны. Так при массивном пожаре уже на расстоянии в несколько сотен метров достигается болевой порог биообъекта [1], а на некотором удалении от фронта пожара — предел огнестойкости многих конструктивных материалов [2]

и их термическое разрушение. Другая особенность, которую необходимо учитывать при рассмотрении процессов, связанных с излучением, — это частичная прозрачность (полупрозрачность) многих (по своей природе диэлектриков) конструкционных материалов и сред. Полупрозрачность среды обуславливает исключительное своеобразие процессов тепло- и сопряженного с ними массопереноса. При действии внешних источников излучения нагреву подвергается не столько поверхность (в области непрозрачности), сколько прилежащий к поверхности слой конечной толщины. В то же время любой элементарный объем нагретой полупрозрачной среды сам является источником излучения, вследствие чего в такой среде помимо теплопереноса путем фоновой или молекулярной проводимости происходит обмен энергией в виде излучения между элементами среды, не находящимися в непосредственном тепловом контакте. Эта особенность “дальнодействия” переноса энергии излучением способствует интенсификации теплообменных и сопутствующих им процессов. Так например, воздействие излучения на абляционную тепловую защиту спускаемых аппаратов, выполненную из композиционного материала, армированного тугоплавкими оксидными волокнами, при абляции которой поверхность покрыта пленкой расплава, теплозащитные характеристики (эффективная энтальпия абляции) существенно ухудшаются с ростом радиационной составляющей в воздействующем тепловом потоке [3]. Более того, в некоторых случаях неучет явления полупрозрачности может привести и к ложным выводам. Например, при воздействии излучения на хлопчатобумажную ткань время воспламенения сухой ткани меньше, чем промасленной [2], что может быть объяснено только с привлечением к анализу явления полупрозрачности оптически неоднородной (рассеивающей) среды.

Имея в виду распространенность процессов теплопереноса излучением, широкий диапазон реализуемых на практике потоков излучения, когда в ряде случаев происходит не только нагрев, но и физико-химические превращения структурно-неоднородной и в общем случае полупрозрачной среды, проблема исследования теплопереноса, процессов термического разрушения и выявление основных закономерностей при действии излучения на композиционные и полупрозрачные материалы является актуальной. Многоплановость проблемы и влияние большого числа факторов на процессы теплопереноса и физико-химических превращений в структурно-неоднородной среде определяет необходимость проведения экспериментальных исследований с целью создания адекватных моделей, описывающих процессы теплопереноса и термического разрушения. Различные аспекты этой проблемы имеют практически важное значение как при оценке реакции различных объектов на воздействие излучения, так и при анализе эффективности и разработке средств тепловой защиты.

Цель работы — создание методологии организации и проведения тепловых испытаний материалов и элементов теплонагруженных конструкций

на установках радиационного нагрева в приложении к исследованию процессов и разработке адекватных моделей теплопереноса и термического разрушения материалов сложного структурного строения, оценке их теплозащитных характеристик и созданию высокоэффективных средств тепло- и огнезащиты объектов, подвергаемых воздействию электромагнитного излучения.

В соответствии с поставленной целью сформулированы **основные задачи диссертации:**

1. Разработка расчетно-теоретических методов анализа процессов радиационного и сложного теплообмена в структурно-неоднородных (композиционных) и полупрозрачных конденсированных средах и характеристик радиационного теплопереноса.
2. Разработка технических средств тепловых испытаний материалов и элементов теплонапряженных конструкций, методик моделирования и экспериментального исследования процессов теплопереноса и термического разрушения композиционных и полупрозрачных материалов при воздействии излучения.
3. Экспериментально-теоретические исследования, разработка моделей, выявление определяющих факторов и оценка параметров процессов теплопереноса и термического разрушения композиционных и полупрозрачных материалов применительно к проблеме создания эффективных средств тепло- и огнезащиты объектов, подвергаемых высокоинтенсивному нагреву.
4. Разработка и обоснование предложений по совершенствованию и созданию высокоэффективных средств тепло- и огнезащиты объектов для условий воздействия интенсивных потоков излучения.

Научная новизна диссертации состоит в том, что в ней систематизированы и обобщены материалы выполненных автором разработок технических средств и методик испытаний тепло- и огнезащитных материалов и элементов теплонапряженных конструкций, а также результаты комплексных экспериментальных и теоретических исследований процессов теплопереноса и термического разрушения композиционных и полупрозрачных материалов при радиационном нагреве, позволившие выявить ряд новых явлений и существенно расширить понимание механизмов термического разрушения широкого круга неметаллических материалов (рис. 1), сформулировать и обосновать адекватные расчетные модели и предложения по повышению эффективности средств защиты объектов, потенциально подверженных воздействию высокоинтенсивного излучения.

К принципиально новым результатам относятся:

- 1) разработка приближенного аналитического метода решения уравнения переноса излучения в полупрозрачной среде с произвольной индикатрисой рассеяния и комплексная оценка точности решений для многослойной поглощающей, излучающей и рассеивающей среды;

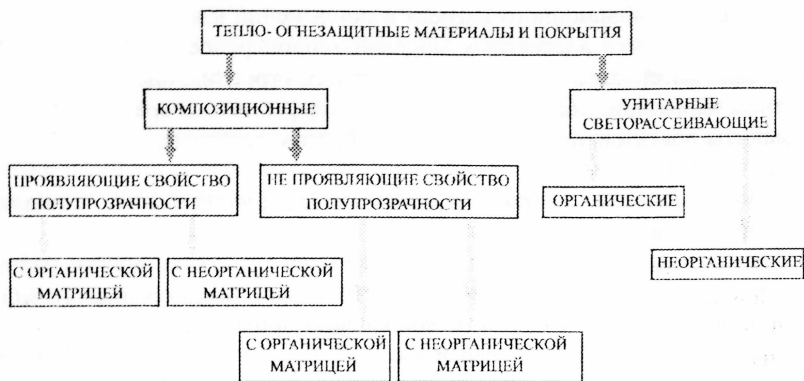


Рис. 1. Схема классификации исследуемых материалов

- 2) комплекс методик определения оптических свойств полупрозрачных рассеивающих сред (материалов) по доступному набору экспериментальных данных о фотометрических и излучательных характеристиках образцов;
- 3) методики и результаты экспериментальных исследований с обобщением данных об эксплуатационных характеристиках трубчатых источников излучения на форсированных и нерасчетных режимах работы и излучательных систем на их основе.
- 4) разработка комплекса стационарных и мобильных установок радиационного нагрева большой мощности для испытаний тепло- и огнезащитных материалов и элементов конструкций в широком диапазоне изменения временных и энергетических параметров нагрева, а также соответствующих методик тепловых испытаний;
- 5) оценка влияния радиационного теплопереноса на параметры аэротермохимического разрушения аблирующего композиционного теплозащитного покрытия с учетом его частичной прозрачности;
- 6) методики и результаты экспериментальных исследований механизмов термического разрушения композиционных армированных материалов на органическом связующем в широком диапазоне изменения состава, структурных свойств материала и внешних условий радиационного теплового воздействия, позволившие выявить основные особенности и параметры процессов разрушения и получить данные о теплозащитных характеристиках исследованных материалов;
- 7) результаты экспериментальных исследований и обобщающие выводы по механизму термического разрушения и теплозащитным характеристикам материалов на основе термостойких неорганических соединений с конденсатным характером диссоциации;

- 8) результаты экспериментальных исследований по оценке стабильности свойств термостойких отражающих теплозащитных материалов при действии коротковолнового электромагнитного излучения;
- 9) физическое обоснование, постановка и решение задачи о температурном состоянии объектов из полупрозрачных рассеивающих материалов, нагреваемых потоком коллимированного излучения; теоретическое выявление основных особенностей процесса нагрева и их экспериментальное подтверждение;
- 10) выявление определяющего влияния структурно-релаксационных процессов в полупрозрачных полимерных материалах на механизм их термического разрушения; обоснование методик экспериментов и первая в мировой практике реализация контролируемой реакции термического распада политетрафторэтилена до конечных термодинамически устойчивых продуктов с экспериментальным определением критических параметров ее инициирования; создание адекватной модели высокотемпературных термических превращений политетрафторэтилена, используемой при анализе систем тепловой защиты и эффективности боеприпасов стрелково-пушечного вооружения, содержащих конструктивные элементы из фторуглеродных материалов;
- 11) разработка предложений по созданию высокоэффективных средств огнетеплозащиты технических устройств, потенциально подверженных воздействию высокоинтенсивного излучения на основе полученных автором результатов экспериментальных исследований и моделирования процессов теплопереноса в огнетеплозащитных композиционных полупрозрачных материалах.

На защиту выносятся:

- 1) методы расчетно-теоретического анализа теплопереноса и термического разрушения композиционных и полупрозрачных рассеивающих теплозащитных материалов при радиационном нагреве;
- 2) методики комплексной оценки оптических свойств рассеивающих материалов по доступному набору экспериментальных данных о фотометрических и излучательных характеристиках образцов;
- 3) результаты комплексных экспериментальных исследований характеристик трубчатых источников излучения на форсированных и нерасчетных режимах работы, технические средства тепловых испытаний материалов и элементов теплонагруженных конструкций при высокоинтенсивном радиационном нагреве;
- 4) результаты комплексных теоретических и экспериментальных исследований процессов теплопереноса и термического разрушения структурно-неоднородных, в том числе частично прозрачных для излучения материалов на основе неорганических и органических соединений; предложения по созданию средств огнетеплозащиты технических устройств, потенциально подверженных воздействию излучения.

Научная и практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что:

- разработана методология экспериментально-теоретических исследований процессов теплопереноса и термического разрушения тепло- и огнезащитных материалов, в том числе проявляющих свойство полупрозрачности, в условиях радиационного нагрева;
- разработан комплекс технических средств для проведения теплофизических исследований и тепловых испытаний материалов и элементов конструкций при радиационном нагреве; технически реализована концепция мобильных установок радиационного нагрева большой мощности, позволившая расширить возможности экспериментальных комплексов в плане реализации условий комбинированного теплового воздействия источниками нагрева различной физической природы и таким образом повысить информативность стендовых испытаний теплозащитных материалов и покрытий теплонапряженных конструкций;
- разработаны и обоснованы в плане объективной оценки точности методики расчета сложного теплообмена в полупрозрачных многослойных элементах конструкций при произвольных условиях облучения и теплового воздействия, методики расчета интегральных оптических характеристик элементов из полупрозрачных рассеивающих материалов. Получен теоретически и подтвержден экспериментально принципиально важный вывод о возможности существенного перегрева внутренней области нагреваемого объекта (среды) из полупрозрачного рассеивающего материала при воздействии коллимированного излучения, что расширило понимание возможных механизмов термического разрушения сильнорассеивающих теплозащитных материалов и покрытий;
- разработана и апробирована совокупность способов и технических средств для экспериментального определения оптических свойств полупрозрачных рассеивающих материалов по доступному набору экспериментальных данных о фотометрических и излучательных характеристиках образцов и даны оценки методических погрешностей;
- проведено теоретическое исследование азротермохимического разрушения композиционного теплозащитного материала на органическом связующем и получены практически важные выводы о роли полупрозрачности в механизме термического разрушения и ее влиянии на теплозащитные характеристики; экспериментально исследованы механизмы термического разрушения одно- и многокомпонентных композиционных теплозащитных материалов в условиях радиационного нагрева на всех стадиях — от момента инициирования до режима квазистационарного разрушения, показана возможность использования простых зонных моделей теплопередачи и термического разрушения композиционных материалов при действии пространственно ограниченного пучка излучения и обоснованы модели для оценки тепловых ха-

рактических термически разрушаемого слоя. По результатам экспериментальных исследований механизма термического разрушения композиционных теплозащитных материалов на органическом связующем с различной структурой и составом композиции показана определяющая роль механического уноса углерода в процессе разрушения при радиационном нагреве; получена оценка параметров радиационного нагрева, определяющих режимы разрушения (объемная деструкция, поверхностное разрушение, абляция). Разработана модель термического разрушения широкого класса термостойких теплозащитных материалов на основе неорганических соединений с конденсатным характером диссоциации и выявлена причина теплозащитного эффекта по отношению к воздействию излучения;

- экспериментально показано, что спектральный состав воздействующего излучения играет существенную роль в отношении стабильности теплозащитных свойств высокоотражающих термостойких материалов. На основе экспериментальных исследований выявлены принципиальные особенности механизма термического разрушения полимерных материалов. Показана важность учета структурно-релаксационных переходов в полимере при анализе тепловых, оптико-физических и теплозащитных характеристик и получены соответствующие количественные оценки. Установлен факт и условия существования режима однородной релаксации объема полимера при нагреве излучением и показано, что с этим непосредственно связана возможность реализации режима квазистационарного разрушения; этот вывод играет существенную роль при оценке теплозащитных характеристик полимерных материалов по данным тепловых испытаний;
- впервые реализована контролируемая реакция термического распада ПТФЭ, играющая определяющую роль в механизме разрушения при действии излучения, определены критические условия ее инициирования и разработана модель термического разрушения ПТФЭ с оценкой характерных времен всех стадий процесса, используемая при анализе систем теплозащиты и эффективности боеприпасов, содержащих конструктивные элементы из фторуглеродных материалов;
- теоретически обоснован подход и экспериментально продемонстрирована его применимость к решению проблемы создания высокоэффективной огнетеплозащиты объектов для условий преимущественного воздействия излучения.

Результаты разработок внедрены на предприятиях ФГУП “НПО машиностроения” (г. Реутов, М.О.), ФГУП “ЦНИИМАШ” (г. Королев, М.О.), ОАО “НПО Композит” (г. Королев, М.О.), ЗЦНИИ МО РФ (г. Москва).

Достоверность полученных результатов определяется обоснованностью допущений теоретических моделей путем сравнения с результатами методических экспериментов и сопоставлением с данными литературных

источников, а данных экспериментальных исследований — воспроизводимостью при многократном повторении экспериментов и непротиворечивостью физическим законам.

Личный вклад автора состоит в разработке методов и алгоритмов расчета процессов теплопереноса в полупрозрачных средах и характеристик светорассеивающих материалов; разработке и практической реализации методов экспериментальных исследований процессов теплопереноса и термического разрушения тепло- и огнезащитных материалов; в эскизной разработке лабораторных экспериментальных установок радиационного нагрева большой мощности и методов тепловых испытаний элементов теплонагруженных конструкций; в анализе, теоретической интерпретации и обобщении результатов экспериментов. Автором впервые установлена определяющая роль структурно-релаксационных процессов в механизме термического разрушения полимерных материалов, выявлена существенная особенность в механизме воздействия коллимированного излучения на светорассеивающие материалы, подтвержденная экспериментально; впервые реализована контролируемая реакция распада политетрафторэтилена на конечные устойчивые продукты со значительным экзотермическим эффектом, определены критические условия ее инициирования и разработана теоретическая модель высокотемпературных термических превращений; впервые обобщены результаты комплексных экспериментальных и теоретических исследований процессов теплопереноса и термического разрушения композиционных и полупрозрачных материалов и разработаны предложения по созданию высокоэффективных средств тепловой защиты объектов от действия излучения.

Апробация результатов, изложенных в диссертации, проводилась на IV–VI Всесоюзных конференциях по радиационному теплообмену (Киев, 1978 г.; Ставрополь, 1982 г.; Каунас, 1987 г.), Всесоюзной конференции “Тепломассообмен и моделирование в энергетических установках” (Тула, 1979 г.), межотраслевых научно-технических конференциях “Методы и средства машинной диагностики ГТД” (Харьков, 1983 г., 1990 г.), V Всесоюзном семинаре по обратным задачам теплопроводности (Уфа, 1984 г.), Всесоюзных совещаниях по газотермическому нанесению покрытий (Дмитров, 1976 г.; Дмитров, 1980 г.; Рига, 1982 г., Дмитров, 1985 г.), Международной конференции “Тепломассообмен-ММФ” (Минск, 1988 г.), Гагаринских научных чтениях по авиации и космонавтике (Москва, 1980 г., 1981 г., 1983 г., 1984 г., 1985 г., 1987 г., 1989 г.), Международной конференции “Ракетно-космическая техника. Фундаментальные и прикладные проблемы механики” (Москва, 2006 г.), XXXI Академических чтениях по космонавтике (Москва, 2007 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано более 100 научных работ, в том числе 52 статьи, из них 32 в ведущих рецензируемых

научных журналах, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора наук согласно Перечня ВАК, получено 2 патента на изобретение (2004 г., 2008 г.).

Структура и объем диссертации. Диссертация содержит введение, 8 глав, общие выводы, заключение. Содержит 471 страницу текста, 235 рисунков, 21 таблицу. Список литературы включает 460 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены основные сведения о работе, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, отмечены научная новизна результатов и их практическая значимость, приведено краткое содержание работы.

В первой главе дан обзор основных проблем и постановка задач исследования теплопереноса в диэлектрических средах и процессов термического разрушения при воздействии интенсивных потоков излучения и высоких температурах применительно к тепловым испытаниям и оценке свойств термостойких и огнетеплозащитных материалов с широким спектром тепло- и оптико-физических свойств. Основу решения таких задач составляет система уравнений сопряженного радиационно-кондуктивного теплообмена для конденсированных сред, содержащая

— уравнение сохранения энергии

$$c_V \frac{\partial T(M)}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{q}_K(M) + \operatorname{div} \vec{q}_R(M) \mp \Omega(M) = 0;$$

$$T(M) \Big|_{t=0} = f_0(M), \quad M \in V$$

с граничными условиями, определяющими характер теплообмена с внешней средой. Здесь T — температура; t — время; $\Omega(M)$ — объемная мощность внутренних источников (стоков) теплоты; $\vec{q}_K(M) = -\Lambda(M) \frac{\partial T(M)}{\partial x_j} \vec{e}_j$ — век-

тор кондуктивного теплового потока; $\vec{q}_R(M) = \int_0^\infty d\nu \int_{4\pi} I_\nu(M, l) (\vec{l} \vec{x}_j) \vec{e}_j d\omega$ — вектор радиационного (лучистого) теплового потока (ν — частота излучения);

— уравнение переноса излучения для рассеивающей среды

$$\frac{dI_\nu(M, l)}{dl} = -(\kappa_\nu + \sigma_\nu) I_\nu(M, l) + n_\nu^2 \kappa_\nu \frac{B_{0\nu}[T(M)]}{\pi} + \frac{\sigma_\nu}{4\pi} \int_{4\pi} \rho_\nu(\widehat{l}, \widehat{l}') I_\nu(M, l') d\omega';$$

$I_\nu(M, l)$ — спектральная интенсивность излучения на луче l ; $B_{0\nu}[T(M)]$ — функция излучения Планка; κ_ν , σ_ν — спектральные коэффициенты поглощения и рассеяния, $\rho_\nu(\widehat{l}, \widehat{l}')$ — спектральная индикатриса рассеяния — феноменологические характеристики (оптические свойства) рассеивающей среды.

Особое внимание акцентировано на учете явления частичной прозрачности материалов рассматриваемого класса по отношению к электромагнитному излучению и проблеме определения оптических свойств рассеивающей среды как важнейшим составляющим методологии исследований процессов теплопереноса и термического разрушения структурно- и оптически неоднородных материалов.

Во второй главе рассмотрены методы расчета теплообмена излучением в полупрозрачных рассеивающих средах и интегральных оптических характеристик объектов из полупрозрачных материалов — коэффициентов отражения, пропускания и излучения. Имея в виду решение прикладных задач сложного радиационно-кондуктивного теплообмена в средах с возможными физико-химическими превращениями (нелинейными по своей сути), когда необходимо использовать итерационную процедуру между полями температуры и излучения, выбор метода решения интегро-дифференциального уравнения переноса излучения важен как с точки зрения скорости вычислений, так и обеспечения достаточной точности расчетов.

В настоящей работе для решения уравнения переноса излучения использован метод моментов, в отличие от предшествующих работ развитый на случай многослойной поглощающей, излучающей и рассеивающей среды с произвольной индикатрисой рассеяния, на которую воздействует направленный или диффузный поток излучения внешнего источника [4–10].

Получены и проанализированы решения уравнения переноса излучения в различных приближениях метода моментов, а комплексные оценки точности показали [4–6], что двухчленное приближение обеспечивает точность расчетов $\varepsilon \sim 5 \dots 10\%$ при $\gamma = \sigma/\kappa \gtrsim 5 \dots 10$, а четырехчленное — при $\gamma \gtrsim 0$.

В третьей главе рассмотрены методы определения оптических свойств полупрозрачных рассеивающих материалов, относящиеся к области обратных задач светорассеяния. В основу положены соотношения, связывающие фотометрические и излучательные характеристики плоских образцов толщиной h (коэффициенты пропускания $\mathcal{T}$, отражения $\mathcal{R}$ (или $\mathcal{R}_x = \mathcal{R}_\infty - \mathcal{R}$), излучения ϵ) с оптическими свойствами среды, полученные на основе решения уравнения переноса излучения методом моментов [9, 11, 12–15].

В традиционной постановке задача сводится к решению парных систем разрешающих уравнений ($\tau^* = \kappa h$) относительно искомым оптических характеристик среды:

$$\begin{cases} \eta_{1,\text{изм}} = \eta_1(\kappa, \sigma, h_1), \\ \eta_{2,\text{изм}} = \eta_2(\kappa, \sigma, h_2) \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} \eta_{1,\text{изм}} = \eta_1(\gamma, \tau_1^*), \\ \eta_{2,\text{изм}} = \eta_2\left(\gamma, \tau_1^* \frac{h_2}{h_1}\right), \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \gamma(\eta_{1,\text{изм}}, \eta_{2,\text{изм}}), \\ \kappa(\eta_{1,\text{изм}}, \eta_{2,\text{изм}}). \end{cases}$$

$\eta_{i,\text{изм}}$ — измеренное значение фотометрической или излучательной характеристики образца ($\mathcal{R}$, $\mathcal{R}_\infty$, $\mathcal{T}$, ϵ).

$$\text{Для разрешающих систем} \quad \begin{cases} \mathcal{R} = \mathcal{R}(\gamma, \kappa); \\ \mathcal{T} = \mathcal{T}(\gamma, \kappa), \end{cases} \quad \begin{cases} \epsilon_1 = \epsilon_1(\gamma, \kappa); \\ \epsilon_2 = \epsilon_2(\gamma, \kappa) \end{cases} \quad \text{при } \gamma \geq 5$$

погрешность оценок оптических характеристик по результатам проведенных исследований составляет $\Delta \lesssim 20\%$.

Существенно новыми являются разработанные методики статистической идентификации оптических свойств рассеивающих материалов по произвольному (экспериментально доступному) набору данных о фотометрических и излучательных характеристиках образцов [13–15]. Их суть состоит во введении новых переменных $\beta = \alpha \kappa \left[\alpha = \sqrt{3(1 + \gamma(1 - \Gamma_{1,0}))} \right]$, $y = (0,5\alpha - 1)/(0,5\alpha + 1)$, связанных с экспериментально определяемыми величинами соотношениями $\beta_R = \varphi_R(\mathcal{R}_e; y)$, $\beta_T = \varphi_T(\mathcal{T}; y)$, $\beta_\epsilon = \varphi_\epsilon(\epsilon; y)$, $\beta_{R_x} = \varphi_{R_x}(\mathcal{R}_x; y)$, которые могут быть записаны в общем виде как

$$\beta_k = \varphi_{k,\eta}(y, \eta_k), \quad y \in y_{\min}, 1. \quad (1)$$

Вид функции $\varphi_{k,\eta}(y, \eta_k)$ определяется фотометрической характеристикой (измеряемой величиной) η_k , к которой она относится: $y_{\min} = 0$, если $\eta_k = \mathcal{T}, \mathcal{R}_x, \epsilon_s$ и $y_{\min} = \mathcal{R}_e$, если $\eta_k = \mathcal{R}_e$.

При N измерениях η_k , $k = \overline{1, N}$ имеем C_N^2 парных систем уравнений

$$\begin{cases} \beta_i = \varphi_{i,\eta}(y, \eta_i), \\ \beta_j = \varphi_{j,\eta}(y, \eta_j), \end{cases} \quad i, j = \overline{1, N}, \quad i \neq j \quad (2)$$

относительно двух неизвестных величин $\beta_{ij} = \beta_i \triangleq \beta_j$ и y_{ij} , которые связаны с оптическими свойствами материала соотношениями $\alpha_{ij} = 2((1 + y_{ij})/(1 - y_{ij}))$; $\kappa_{ij} = \beta_{ij}/\alpha_{ij}$; $\gamma_{e,ij} = \gamma_{ij}(1 - 0,5\Gamma_{1,0}) = \alpha_{ij}^2/3 - 1$.

Система уравнений (2) сводится к нелинейному алгебраическому уравнению относительно y

$$\varphi_{i,\eta}(y, \eta_i) = \varphi_{j,\eta}(y, \eta_j), \quad y \in y_{\min}, 1,$$

имеющему единственное решение. В табл. 1 приведены методические погрешности оценок оптических характеристик рассеивающего материала при использовании различных исходных данных и коэффициенты чувствительности k_{ij} по отношению к погрешностям исходных данных ($\epsilon_{x_i}^2 = k_{ij}\epsilon_{\eta_j}^2$).

Рассмотрены два варианта методики статистической идентификации.

1. При N измерениях η_i имеем C_N^2 парных систем уравнений (2), порождающих набор искоемых величин x_p (это γ_p, κ_p), $p = \overline{1, C_N^2}$, что дает оценку

$$\bar{x} = \frac{1}{C_N^2} \sum_{p=1}^{C_N^2} x_p, \quad S_x = \sqrt{\frac{1}{C_N^2 - 1} \sum_{p=1}^{C_N^2} (\bar{x} - x_p)^2}$$

с невязкой $S_\eta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [\eta_k - \bar{\eta}_k(\bar{\gamma}_e, \bar{\kappa})]^2}$.

Таблица 1

		$\gamma_e = 20, \omega_e = 0,95$	$\gamma_e = 40, \omega_e = 0,975$	$\gamma_e = 200, \omega_e = 0,995$			
		η_i					
η_j		R_e	T	R_e	T	R_e	T
R_e	ε_x	0,04...0,15	0,02...0,08	0,04...0,1	0,01...0,06	0,01...0,2	0,002...0,01
	ε_γ	0,03...0,1	0,05...0,1	0,01...0,15	0,01...0,08	0,01...0,15	0,01...0,07
	k_x	15	3	10	7	51	10
	k_γ	5	5	8	8	13	13
T	ε_x		0,07...0,15		0,07...0,2		0,02...0,1
	ε_γ		0,1...0,2		0,1...0,2		0,01...0,15
	k_x		3		2		4
	k_γ		6		5		5

2. При N измерениях η_i имеем N соотношений (1) с неизвестными β, y . Их оценки

$$\bar{y} \rightarrow \min S_\beta(y); \quad \bar{\beta} = \bar{\beta}(\bar{y}) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \beta_k(\bar{y}),$$

$$\text{где } S_\beta(y) = \left\{ \sum_{k=1}^N [\bar{\beta} - \beta_k(y)]^2 / (N-1) \right\}^{1/2}.$$

Существенная особенность разработанных методов — учет угловой структуры (направленности) зондирующего излучения, что увеличивает достоверность получаемых данных об оптических свойствах рассеивающих материалов и расширяет возможности использования различных экспериментальных схем. В частности, это позволило определить свойства сильнорассеивающего материала — пористого политетрафторэтилена по данным о коэффициентах пропускания набора образцов разных толщин при использовании направленного зондирующего пучка излучения (табл. 2).

Таблица 2

$\rho \cdot 10^{-3}, \text{ кг/м}^3$	2,13	1,55	1,16	1,13	1,07	0,74	0,72
$\sigma_e \cdot 10^{-3}, \text{ м}^{-1}$	1,25	11,35	11,96	9,66	9,94	7,84	7,29
$\kappa \cdot 10^{-3}, \text{ м}^{-1}$	0,013	0,0015	0,001	0,002	0,0013	0,0016	0,003
γ_e	350	7500	23000	4700	13500	5400	2300
$R_{e\delta, \infty}$	0,86	0,967	0,981	0,959	0,976	0,962	0,942
$z_{\max} \cdot 10^{-3} \text{ м}$	0,37	0,27	0,21	0,29	0,19	0,34	0,37

Примечание. $R_{e\delta, \infty}$ — коэффициент отражения полубесконечного слоя; $z_{\max}$ — координата максимума тепловыделения.

Комплексная оценка корректности изложенных методик и достоверности данных об оптических характеристиках материалов получена при проведении целевых экспериментальных исследований [16, 17].

В четвертой главе приведены результаты комплексных экспериментальных исследований характеристик трубчатых источников излучения на форсированных и нерасчетных режимах работы, позволяющих достичь предельно высоких плотностей потоков излучения на поверхности нагреваемого объекта [18, 19]. Необходимость проведения таких исследований связана с тем обстоятельством, что трубчатые источники излучения в ряде случаев наиболее перспективны при проведении тепловых и теплопрочностных испытаниях материалов, элементов и полномасштабных конструкций. Однако их эффективное использование связано с решением двух основных проблем: 1) получении предельно высокой плотности потока излучения на поверхности образца с размерами, отражающими основные особенности макроструктуры материала, и при которых сводятся к минимуму неопределенности, связанные с теплообменом образца с окружающей средой; 2) нагревом развитых (в том числе сложной формы) поверхностей по заданным временному закону и распределением плотности потока излучения по поверхности.

Исследования проведены для выпускаемых промышленностью наиболее мощных источников излучения с нитью накала (галогенные лампы (ГЛН) КГ220-1000, КГ220-2000, КГТО220-2500, КГ220-5000, КГ220-10000), газоразрядных водоохлаждаемых источников непрерывного (ДТП 10-200, ДКсТВ-6000) и импульсного (ИНП 16-120, ИНП 16-250) режимов работы. При этом получены и систематизированы [19] данные по спектральным ($I_\lambda(\lambda)$), вольтамперным ($I(U)$, $\dot{I}$, U — соответственно ток и напряжение), энергетическим ($q_R(U)$), пространственным ($q_R(\vec{r})$, $\vec{r}$ — координатный вектор) и инерционным (динамическим, $q_R(t) \div U(t)$) характеристикам. Кроме того, получены данные по важнейшей эксплуатационной характеристике — ресурсу работы. Так для водоохлаждаемого источника ДТП 10-200 среднестатистическое время работы при $250 < U < 360$ В определяется зависимостью $\sqrt{t, (\text{мин})} = 27,52 - 0,0717U$, а для импульсных источников в квазинепрерывном (нерасчетном) режиме работы с длительностью $\Delta t \lesssim 1,0$ с критична величина срабатываемой энергии — $\Delta E \sim 80 \dots 100$ кДж.

Результаты проведенных исследований позволили спроектировать, изготовить и использовать для проведения серийных тепловых испытаний материалов, элементов конструкций и теплофизических исследований ряд экспериментальных установок, описание и эксплуатационные характеристики которых, а также некоторые примеры применения [9, 20–25] приведены в главе 5. Там же дано описание и характеристики установки радиационного нагрева на базе блока квантовых генераторов [26], описание разработанных, изготовленных и использованных при проведении экспериментальных исследований датчиков теплового потока [27, 28], а также методика определения параметров пространственно ограниченного пучка излучения большой

мощности [29]. Некоторые методические вопросы, связанные с измерением температуры контактными датчиками (термопарами) в полупрозрачных материалах, рассмотрены в работах [30, 31].

В главе 6 рассмотрены вопросы, связанные с теплообменом в полупрозрачной рассеивающей среде при воздействии пространственно ограниченного пучка излучения [32–35]. Экспериментально показано, что этот случай имеет характерную особенность, обусловленную оптическими свойствами среды: если среда оптически однородна (полиметилметакрилат), то объемному нагреву за счет поглощения излучения подвержена только область в зоне воздействия пучка излучения; если же среда оптически неоднородна — рассеивающая (политетрафторэтилен), то нагреву подвержена и область вне зоны непосредственного воздействия излучения. В этом случае корректный анализ процессов теплопереноса может быть выполнен только на основе модели, учитывающей как кондуктивный, так и радиационный теплоперенос с учетом рассеяния излучения. Применительно к этому случаю рассмотрен процесс теплопереноса для плоского цилиндрического слоя толщиной H и радиусом R , облучаемого пространственно ограниченным пучком излучения радиусом R_0 с произвольным распределением плотности потока излучения по сечению, который описан уравнением теплопроводности с внутренним источником, обусловленным переносом энергии излучением, с соответствующими краевыми условиями и уравнением переноса излучения в диффузионном приближении.

Комплексная оценка корректности используемой модели и расчетной методики [33, 34] проведена при сопоставлении расчетных и экспериментальных данных по времени достижения температуры интенсивной термострукции (инвариантной по отношению к условиям нагрева) модельного композиционного рассеивающего материала на основе связующего (эпоксидная смола ЭД-20) с мелкодисперсным наполнителем (частицы оксида алюминия) [35]. При этом исходные данные для расчетов (теплофизические, оптические, характеристики пучка излучения) получены экспериментально на основе разработанных методик. Полученные результаты использованы при анализе и обобщении закономерностей теплопереноса в рассеивающей среде в широком диапазоне изменения оптических характеристик среды и пучка воздействующего излучения, оценке условий применимости простых локально-одномерных расчетных схем [32–34], а также служат составной частью методики определения лучевой прочности отражающих теплозащитных материалов по результатам лабораторных испытаний.

Результаты и выводы, изложенные в главах 2–6, являются основой методологии исследований процессов теплопереноса и термического разрушения композиционных и полупрозрачных материалов при действии излучения.

В главе 7 приведены результаты исследования процессов теплопереноса и термического разрушения композиционных материалов (КМ) в широком диапазоне условий нагрева и изменения характеристик материала.

Одна из наиболее важных прикладных задач — определение параметров уноса массы (абляции) композиционного стеклонаполненного ТЗМ в высокосубзвуковом газовой потоке — в развитие предшествующих работ Ю.В. Полежаева и В.В. Горского рассмотрена с учетом частичной прозрачности аблирующего ТЗМ [36]. Основанием для этого служит тот факт, что при абляции поверхность таких материалов в наиболее общем случае покрыта пленкой расплава наполнителя. В связи с этим физическая модель представлена многослойной схемой, содержащей полупрозрачный слой расплава, непрозрачный слой с прококсованным органическим связующим и слой исходного (в общем случае полупрозрачного) КМ. Предполагается, что полное разложение (коксование) связующего происходит во фронте при температуре T_f , газообразные продукты разложения связующего и реакции гетерогенного взаимодействия наполнителя (SiO_2) с углеродом кокса (CO , H_2 , SiO) вдуваются в пограничный слой, реагируя с компонентами набегающего потока воздуха. Часть расплава наполнителя испаряется и диссоциирует, а другая под действием сил трения уносится в жидком виде. Углерод кокса, кроме гетерогенного взаимодействия с наполнителем, может уноситься механически или реагировать с испарившимися молекулами оксида кремния и химически активными компонентами набегающего потока.

При анализе процессов термохимического разрушения стеклонаполненных КМ в высокосубзвуковом газовой потоке основные процессы, определяющие теплозащитный эффект, связывают с наполнителем, что дает основание использовать наиболее простую модель аблирующего ТЗМ как однородного стеклообразного материала (модель I), для учета реальных процессов переходя к более сложным моделям, включающим механический унос углерода кокса (модель II), поверхностное выгорание углерода (модель III) и его гетерогенное взаимодействие с наполнителем (модель IV).

Проведенные исследования показали, что в условиях аэродинамического (конвективного) нагрева усложнение модели (механизма) термического разрушения ТЗМ приводит к снижению роли полупрозрачности (рис. 2) и для сложных схем разрушения этот фактор может не приниматься во внимание. В случае же радиационно-конвективного нагрева увеличение радиационной составляющей во внешнем тепловом потоке приводит к существенному ухудшению абляционных характеристик ТЗМ (рис. 3), проявляющих свойство полупрозрачности, и этот фактор должен всегда приниматься во внимание.

Однако в условиях преимущественно (или только) радиационного нагрева рассмотренная схема неадекватна реальному процессу (качественный анализ результатов испытаний на установке с газоразрядными источниками

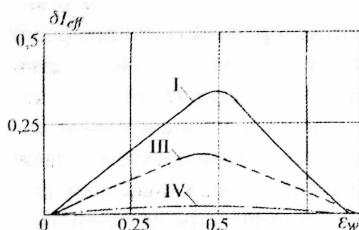


Рис. 2. Зависимости степени отклонения энтальпии абляции от эффективной степени черноты относительно непрозрачного материала для моделей однородного газификации (I), поверхностной газификации (III) и гетерогенного выгорания (IV) угля

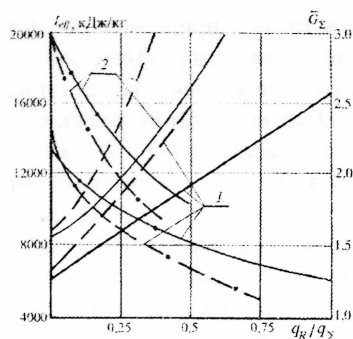


Рис. 3. Зависимость эффективной энтальпии I_{eff} (—●— $\kappa_1 = 10^4 \text{ м}^{-1}$, —●— $\kappa_1 = 10^3 \text{ м}^{-1}$) и безразмерной скорости разрушения $\bar{G}_{\Sigma, \infty}$ (— — $\kappa_1 = 10^4 \text{ м}^{-1}$, --- — $\kappa_1 = 10^3 \text{ м}^{-1}$) от величины безразмерного теплового потока при суммарном тепловом потоке $q_{\Sigma, w} = 30000$ (1) и 50000 кВт/м^2 (2)

излучения показал (рис. 4, 5), что поверхность покрыта не пленкой, а каплями расплава). Проведенные экспериментальные исследования позволили установить три характерных режима разрушения композиционных ТЗМ, определяемых как условиями нагрева (плотностью потока излучения), так и свойствами основных компонентов ТЗМ — коксовым числом связующего и типом наполнителя, выявить основные закономерности и разработать соответствующие модели процесса термического разрушения композиционных ТЗМ [26, 29, 37, 38].

Режим объемной деструкции (см. рис. 4, б) описан двухслойной моделью, включающей внешний слой с прококсованным органическим связующим, и слой исходного материала, разделенных фронтом коксования связующего. Продукты деструкции связующего, фильтруясь через прококсованный слой, вдуваются в пристеночное пространство, где, при наличии кислорода, сгорают [38], выделяя при этом теплоту. Этот режим разрушения реализуется при относительно небольшой плотности потока излучения ($\lesssim 500 \text{ Вт/см}^2$) и характерен, например, для огнестойких армированных пластиков или пеногенных огнезащитных материалов в условиях воздействия излучения пожаров.

При плотности потока излучения $\gtrsim 500 \text{ Вт/см}^2$ реализуется режим поверхностного разрушения, характерный тем, что расплав (в виде капель) на

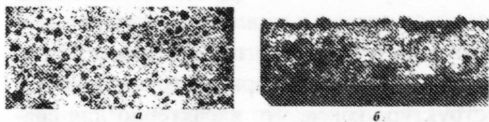


Рис. 4. Иллюстрация различий механизмов термического разрушения: поверхность стеклотекстолита после воздействия высокотемпературного газового потока (а) (разрушение с образованием пленки расплава) и потока излучения плотностью $\sim 0,2 \cdot 10^4$ кВт/м² (б) (пленка расплава отсутствует — режим объемной деструкции)

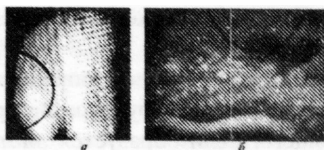


Рис. 5. Фрагмент киносъемки процесса радиационного нагрева стеклопластика при плотности потока излучения $\sim 0,2 \cdot 10^4$ кВт/м²: а — начальная стадия; б — стадия термического разрушения с плавлением наполнителя

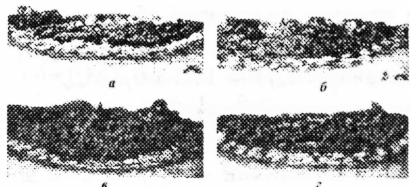


Рис. 6. Срезы образцов стеклотекстолита для ряда экспозиций (сек) действующего излучения со средней плотностью потока $0,58 \cdot 10^4$ кВт/м² (числитель — общее время воздействия, знаменатель — время разрушения): а — 8,98/6,61; б — 11,77/8,86; в — 17,73/14,78; г — 20,73/20,14 (режим поверхностного разрушения)

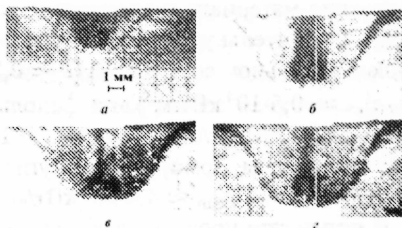


Рис. 7. Срезы образцов стеклотекстолита для ряда экспозиций (сек) действующего излучения со средней плотностью потока $2,75 \cdot 10^4$ кВт/м²: а — 5,7 с; б — 15,6 с; в — 19,4 с; г — 28,2 с (режим развитого разрушения — абляции)

поверхности отсутствует и унос массы происходит за счет гетерогенного взаимодействия углерода кокса с наполнителем и его сублимации; толщина прогрева невелика, а коксование связующего и унос массы происходят в пределах 1...2 слоев композиционного материала (рис. 6).

Третий режим — развитого разрушения (абляции) характерен тем, что по истечении некоторого времени с момента воздействия излучения устанавливается квазистационарная суммарная скорость разрушения материала как единого целого, а зона разрушения (см. рис. 7) приобретает стационарную форму, описываемую ограниченным числом параметров [37, 39]. При этом временные и массовые характеристики уноса, также как и предельно минимальная плотность потока излучения $q_{R, \min}$, при которой реализуется

режим абляции, определяются типом связующего (его коксовым числом) и наполнителя.

Установлено, что определяющую роль в процессе термического разрушения играет структура материала, формирующаяся при деструкции связующего. Если образуется плотная структура кокса, что характерно для связующих с большими коксовыми числами (например, фенольных), то для КМ, армированных волокнами оксидных соединений, механизм термического разрушения и теплозащитные характеристики определяются реакциями гетерогенного взаимодействия наполнителя и углеродной матрицы, а для КМ, армированных углеродными волокнами, — сублимацией углерода. Если же выход кокса при деструкции связующего мал (например, эпоксидных с $\bar{k} \approx 0,2$), то реализуется механизм преимущественно механического уноса углерода кокса. В соответствие с этим изменяются и теплозащитные характеристики. Так получено, что эффективная теплота абляции (функционал состояния материала и внешних условий нагрева, по которой обычно проводят сравнительную оценку эффективности ТЗМ) для стеклотекстолита на эпоксифенольном связующем ($\bar{k} \approx 0,2$) составляет $I_{eff} \approx 11,1 \pm 0,7$ МДж/кг ($q_{Rmin} \approx 0,5 \cdot 10^4$ кВт/м²), на фенольном связующем ($\bar{k} \approx 0,6$) — $I_{eff} \approx 15,2 \pm 0,7$ МДж/кг ($q_{Rmin} \approx 1,0 \cdot 10^4$ кВт/м²) и углепластика на фенольном связующем, армированном углеродными волокнами — $I_{eff} \approx 25,5 \pm 1,0$ МДж/кг ($q_{Rmin} \approx 4,0 \cdot 10^4$ кВт/м²).

В результате проведенных исследований предложена методика экспериментального определения такой важной характеристики аблирующих ТЗМ, как коэффициент теплопроводности разрушающегося слоя [39]. Установлено, что эта величина непосредственно связана с механизмом разрушения и может быть представлена в виде функции обобщенной переменной — скорости уноса массы, отражающей весь комплекс процессов (в том числе релаксационных процессов формирования углеродной структуры кокса), протекающих при термическом разрушении. Получены конкретные результаты: для стеклотекстолита на эпоксидном связующем $\lambda_c = 0,11 \dot{G}_\Sigma^{1,2}$ Вт/(м·К), на фенольном — $\lambda_c = 0,346 \dot{G}_\Sigma^{0,68}$ Вт/(м·К).

Процесс термического разрушения неорганических ТЗМ исследован на примере нитрида кремния (Si_3N_4) [40] и отражает основные закономерности для целого класса ТЗМ с конденсатным характером диссоциации (например, нитридов AlN , Ba_3N_2 , карбидов TaC , WC , SiC , NbC , силицидов $NbSi_2$, $ZrSi_2$, боридов TaB_2 , TiB , W_2B_5 и др.). Показано, что процесс термического разрушения может быть описан двухслойной моделью — исходный материал, покрытый пленкой расплава (кремния), сублимирующего с поверхности. По экспериментальным данным получены данные об основных параметрах разрушения (температуре поверхности и термодинамической теплоте абляции) в функции плотности потока излучения, а также эффективной теплоты абляции: $I_{eff} \approx 31 \dots 35$ МДж/кг, величина которой существенно превышает термодинамическую теплоту абляции. Установлено, что этот факт (т.е.

теплозащитный эффект) связан с рассеянием излучения на частицах кремния, конденсированного в потоке из газовой фазы [40].

В главе 8 рассмотрены процессы теплообмена и термического разрушения полупрозрачных теплозащитных материалов. Основной теплозащитный эффект этого класса материалов связан с объемным отражением излучения, однако физико-химические процессы, происходящие при воздействии излучения, существенным образом могут повлиять на теплозащитные характеристики. Так показано [9], что даже для термостойких отражающих ТЗМ (особочистая кварцевая керамика) существенную роль в плане стабильности оптических свойств (и отражательной способности) играет спектральный состав воздействующего излучения, а увеличение ультрафиолетовой составляющей приводит к необратимому ухудшению оптических свойств.

Установлено, что кроме спектрального состава в процессах взаимодействия излучения с рассеивающими ТЗМ существенна роль и пространственных характеристик воздействующего пучка излучения [8, 9]. Теоретически [8] (рис. 8) (а позднее и экспериментально [41]) показано, что при воздействии коллимированного пучка излучения максимум тепловыделения локализован не на поверхности, как в случае диффузного излучения, а на глубине

$$h_{\max} = \frac{1}{\kappa(\varepsilon_\gamma - \alpha)} \ln \frac{-\varepsilon_\gamma^2(1 + D_1)}{\alpha^2 S_{ed}^0},$$

где $\varepsilon_\gamma = 1 + \gamma$; $\alpha = \sqrt{3(1 + \gamma(1 - \Gamma_{1,0}))}$; $\Gamma_{1,0} = \int_0^\pi \rho(\beta) \sin \beta \cos \beta d\beta$;

D_1 и S_{ed}^0 — параметры светорассеяния [8, 9]. Это приводит к тому, что в поверхностном слое реализуется большой градиент температуры (рис. 9) и в зависимости от физико-механических свойств ТЗМ может измениться механизм термического разрушения — абляция сменяется на диспергирование, т.е. чисто механический унос, что существенно ухудшает теплозащитные характеристики. В случае же органических рассеивающих материалов перегрев внутреннего слоя может привести к тому, что в этой области образуется своеобразный микрореактор, и если условия в нем таковы, что цепь химических реакций приводит к образованию поглощающих излучение веществ, то разрушение приобретает лавинообразный характер в волне поглощения, что впервые установлено [41, 44] при анализе процесса термического разрушения политетрафторэтилена (ПТФЭ) — одного из наиболее термостойких и перспективных к применению в системах тепловой защиты полимерных материалов.

В результате проведенных исследований впервые установлена [42, 43] определяющая роль релаксационных процессов на всех стадиях термического разрушения ПТФЭ.

В начальной стадии — деполимеризации, протекающей по радикально-цепному механизму, это связано с тем, что кинетика одной из стадий

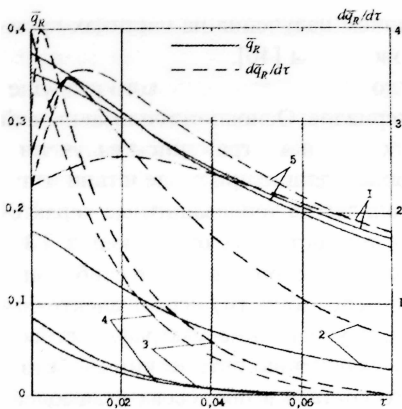


Рис. 8. Поток излучения и объемное тепловыделение в слое светорассеивающего материала в функции оптической координаты: 1...4 — изотропное рассеяние; 1, 2, 3 — направленное освещение при $\gamma = 40, 200$ и 1000 ; 4 — диффузное освещение при $\gamma = 1000$; 5 — анизотропное рассеяние при $\gamma = 200$ и $\Gamma_{10} = 1,6$

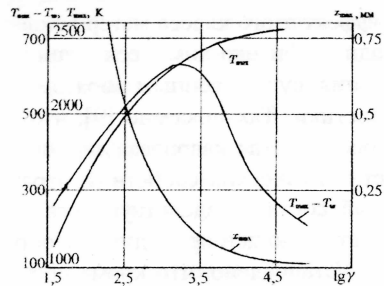


Рис. 9. Зависимости координаты $x_{\max}$ максимума температуры, температуры $T_{\max}$ в максимуме и разности температур в максимуме и на поверхности $T_{\max} - T_w$ от коэффициента удельного рассеяния

кинетической цепи, а именно, обрыв цепи в результате рекомбинации радикалов, есть функция физического состояния (частично кристаллическое или аморфное) полимера. Плавление кристаллической фазы — процесс с характерным временем $\tau_m \lesssim 1$ с, в связи с чем при определенных условиях нагрева характерное время плавления превышает характерное время деполимеризации и термическое разрушение будет происходить без образования расплава, а отношение скоростей уноса массы в кристаллическом ($\dot{G}'_{\Sigma}$) и аморфном (расплавленном) ($\dot{G}_{\Sigma}$) состояниях существенно различны: $\dot{G}'_{\Sigma}/\dot{G}_{\Sigma} \simeq 10^{3,3} \exp(-8500/RT_w)$. Условие существования расплава $t_m = (T_w - T_m)/(dT/dt) > \tau_m$, где T_w, T_m — температура на поверхности и плавления (аморфизации) кристаллической фазы, и абляция ПТФЭ без плавления (аналог сублимации) реализуется при $\bar{b} = (dT/dt) \geq 400$ К/с, что для условий аэродинамического нагрева соответствует $\dot{G}_{\Sigma} \geq 0,5$ кг/(м²с) и плотности теплового потока $q_w \geq 10^6$ Вт/м² [42].

Для условий радиационного нагрева выделено два характерных режима начальной стадии разрушения. В случае больших темпов нагрева (импульсное воздействие) разрушение без плавления кристаллической фазы имеет место при $\bar{b} \gtrsim 10^4 \dots 10^5$ К/с (например, для плотного ПТФЭ это имеет

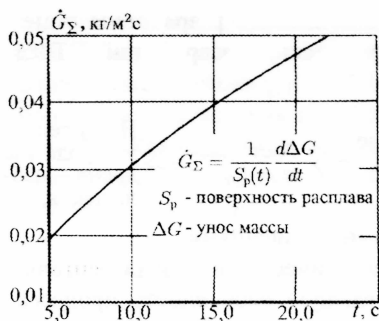


Рис. 10. Зависимость скорости уноса массы от времени в режиме неоднородной релаксации объема ($\bar{b} > 5$ K/c)

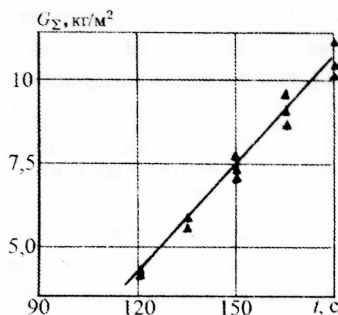
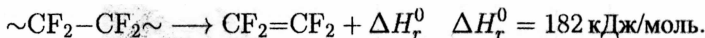


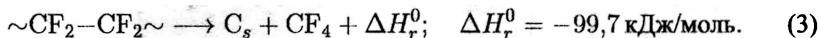
Рис. 11. Зависимость суммарного уноса массы в режиме однородной релаксации ($\bar{b} \lesssim 5$ K/c)

место при $q_{R0} \approx 10^{10}$ Вт/м²), а при $\bar{b} \lesssim 10^4$ K/c реализуется режим разрушения с плавлением. Проведенные исследования [43] показали, что в этом случае может быть выделен специфический для условий радиационного нагрева режим разрушения однородной релаксации нагреваемого объекта, суть которого состоит в выполнении условия равномерной разгрузки образца от теплового давления, вызванного объемным поглощением излучения, по всему сечению; в этом случае фронт плавления — плоский и, например, для плотного ПТФЭ имеет место при скорости нагрева $\bar{b} \lesssim 5$ K/c. Установлено, что только в этом случае может быть реализован квазистационарный режим разрушения, в то время как при больших скоростях нагрева квазистационарный режим разрушения недостижим (рис. 10, 11).

Специфика стадии высокотемпературных термических превращений ПТФЭ определяется его термодинамическими свойствами и условиями нагрева. Общепринятый механизм термического разрушения ПТФЭ — радикальная деполимеризация (эндотермическая реакция)

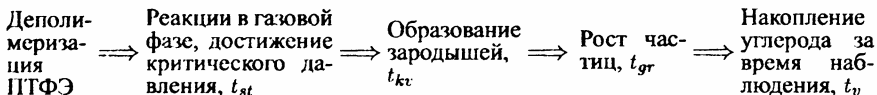


Однако ПТФЭ — термодинамически неустойчивое соединение, при распаде которого до термодинамически устойчивых соединений выделяется значительное количество энергии:



Вместе с тем известно, что ПТФЭ при обычных условиях — один из наиболее стабильных полимеров. В результате проведенных исследований впервые реализована контролируемая реакция (3) и установлено, что она протекает в газовой фазе и критические условия ее инициирования таковы: температура $T \approx 2500$ K и давление $p \gtrsim 0,35 \dots 0,5$ МПа [44].

На основе полученных экспериментальных данных разработана кинетическая модель высокотемпературных термических превращений ПТФЭ [41], включающая следующие стадии



описанные соответствующими кинетическими уравнениями.

Результаты проведенных комплексных теоретических и экспериментальных исследований позволили установить важную особенность процесса термического разрушения рассеивающих полимерных ТЗМ (ПТФЭ) при действии коллимированного излучения — локализация максимума тепловыделения в подповерхностном слое и совокупная кинетика протекающих процессов может привести к резкому ухудшению теплозащитных характеристик ТЗМ в связи с возможностью их карбонизации, как следствия термодинамической неустойчивости, и лавинообразному разрушению в волне поглощения (рис. 12).

Таким образом термодинамическая неустойчивость рассеивающих полимерных ТЗМ может наложить существенные ограничения на допустимую область их эксплуатации при высокоэнергетических воздействиях. В этом смысле большую перспективу в ряде случаев имеют высокоотражающие ТЗМ неорганического происхождения, такие как светорассеивающие керамики и композиционные материалы на неорганической основе.

Проведенные оценки отражающих характеристик КМ на силикатном связующем с разными типами дисперсных наполнителей [45] показывают, что в качестве отражающих ТЗМ для широкополосного излучения с эквивалентной яркостной температурой 1500...3000 К, характерной для процессов горения различных веществ, наиболее эффективны покрытия с наполнителем

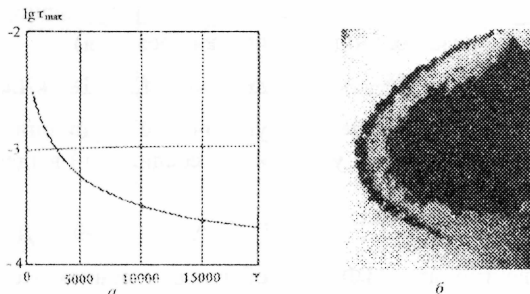


Рис. 12. График зависимости безразмерной координаты максимума энерговыделения $\tau_{\max} = \alpha h_{\max}$ от величины показателя удельного рассеяния (*a*) и зона термического разрушения ПТФЭ (*б*) при действии потока коллимированного излучения

из алюмомагнетитовой шпинели. Суммарный теплозащитный эффект покрытий такого типа экспериментально исследован при воздействии излучения с плотностью потока $q_{R0} \approx 100 \text{ кВт/м}^2$, что может рассматриваться как наиболее жесткие условия при пожаре, на стальную подложку с покрытием (рис. 13). Как следует из результатов экспериментов, наиболее эффективно покрытие с 50 %-й концентрацией шпинели.

Существенный недостаток силикатных связующих — гигроскопичность и хрупкость — стимулировали проведение комплексных исследований других композиций, а также системы комбинированной огнетеплозащиты [2], представляющую собой двухслойный пакет из вспучивающегося огнезащитного материала СГК-1 на основе хлорсульфурованного полиэтилена и терморасширяющегося графита и внешнего отражающего слоя. Его роль могут выполнять чехлы из волокнистых или тканых материалов (рассматривались материалы на основе волокон полиакрилонитрила и стекловолокна) или дисперснонаполненные покрытия. При этом внешний слой в максимальной степени должен обеспечить защиту от излучения, а слой вспучивающегося материала выполняет роль предохранителя, срабатывающего при непосредственном контакте с пламенем, или при длительном пребывании защищаемого объекта в зоне пожара. Проведенные исследования показа-

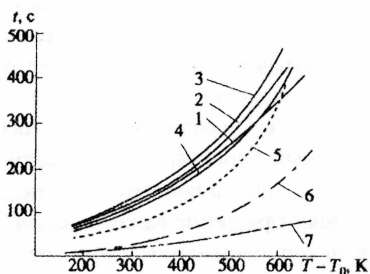


Рис. 13. Температура металлической подложки с покрытиями при нагреве потоком излучения пожара: 1... 4 — покрытие с наполнителем из алюмомагнетитовой шпинели при концентрации 20 % — (1), 40 % — (2), 50 % — (3), 80 % — (4); 5 — с наполнителем из оксида магния с концентрацией 20... 40 %; 6 — с наполнителем из оксида алюминия с концентрацией 20... 40 %; 7 — подложка без покрытия

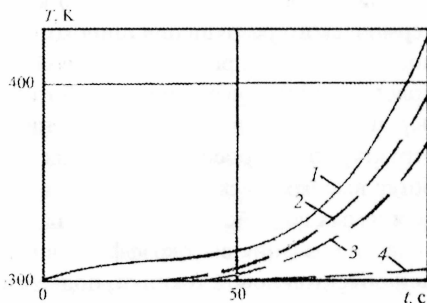


Рис. 14. Изменение температуры в трехслойной системе стальная подложка (2 мм) — слой СГК-1 (2 мм) — дисперснонаполненный полиэтилен (2 и 3 мм): 1 — внешняя поверхность; 2, 3 — стык с СГК-1; 4 — подложка

ли (рис. 14), что наиболее эффективным для огнетеплозащиты объектов по ряду показателей (в том числе эксплуатационных) является двухслойное покрытие из материала СГК-1 с толщиной слоя не менее 2 мм и внешним слоем из дисперснонаполненного алюмомагнетитовой шпинелью полиэтилена или стеклоткани толщиной не менее 2 мм. Погонная масса первого составляет $4,6 \text{ кг/м}^2$, а второго — $3,3 \text{ кг/м}^2$. Однако использование чехлов из стеклоткани сопряжено с рядом проблем, таких как загрязнение и влагонасыщение (уменьшают отражательную способность), возможность механических повреждений, сложность надежного крепления на конструкции и т.п. Поэтому для защиты объектов, потенциально подверженных тепловому воздействию в условиях массивованных пожаров, наиболее приемлемо покрытие на основе материала СГК-1 с внешним объемно отражающим слоем из дисперснонаполненного полиэтилена.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В диссертации решена научная проблема организации и проведения тепловых испытаний материалов и элементов теплонагруженных конструкций на установках радиационного нагрева на основе созданной методологии, содержащей взаимосвязанную совокупность технических средств проведения испытаний, методик расчетно-теоретических и экспериментальных исследований процессов радиационно-кондуктивного теплообмена, механизмов термического разрушения широкого круга тепло- и огнезащитных материалов, в том числе проявляющих свойство полупрозрачности. Указанная методология использована при разработке адекватных моделей процессов теплопереноса и термического разрушения теплозащитных материалов сложного структурного строения, оценке их теплозащитных характеристик и разработке высокоэффективных средств тепло- и огнезащиты конструкций, подвергаемых воздействию излучения, и обеспечивает решение важных задач в области создания высокоэффективных средств тепловой защиты при создании объектов новой техники, подвергаемых высокоинтенсивному нагреву, а также при анализе возможных последствий воздействия излучения в условиях экстремальных ситуаций природных катастроф и техногенных аварий, сопровождающихся интенсивным тепловыделением.

1. Разработан комплекс технических средств для проведения теплофизических исследований и тепловых испытаний материалов и фрагментов конструкций при высокоинтенсивном радиационном нагреве; технически реализована концепция мобильных установок радиационного нагрева большой мощности, позволившая расширить возможности экспериментальных комплексов в плане реализации условий комбинированного теплового воздействия источниками нагрева различной физической природы и таким образом повысить информативность стендовых испытаний теплозащитных материалов и покрытий теплонагруженных конструкций.

2. Разработаны и обоснованы в смысле объективной оценки точности методики расчета радиационно-кондуктивного теплообмена в полупрозрачных и многослойных фрагментах конструкций при произвольных условиях облучения и теплового воздействия, а также интегральных оптических характеристик элементов из полупрозрачных рассеивающих материалов. Получен теоретически и подтвержден экспериментально принципиально важный вывод о возможности существенного перегрева внутренней области нагреваемого объекта (среды) из полупрозрачного рассеивающего материала при воздействии направленного излучения.

3. Разработана и апробирована совокупность способов и технических средств для экспериментального определения объемных оптических свойств полупрозрачных рассеивающих материалов по произвольному набору данных о фотометрических и излучательных характеристиках образцов и даны оценки методических погрешностей.

4. Проведено теоретическое исследование аэротермохимического разрушения композиционного теплозащитного материала на органическом связующем и экспериментальное исследование механизмов термического разрушения одно- и многокомпонентных композиционных теплозащитных материалов в условиях высокоинтенсивного радиационного нагрева на всех стадиях — от момента инициирования разрушения до режима квазистационарного разрушения. Предложена экспериментальная методика и выявлены условия объективной оценки лучевой прочности композиционного материала по результатам лабораторных испытаний. На основе результатов экспериментальных исследований доказана возможность использования простых зонных моделей теплопередачи и термического разрушения композиционных материалов при действии пространственно ограниченного пучка излучения и обоснована модель для оценки тепловых характеристик термически разрушаемого слоя. По результатам экспериментальных исследований процессов и механизмов термического разрушения композиционных теплозащитных материалов на органическом связующем с различной структурой и составом композиции показана определяющая роль механического уноса углерода в процессе разрушения при высокоинтенсивном радиационном нагреве. Разработана модель термического разрушения широкого класса термостойких теплозащитных материалов на основе неорганических соединений.

5. Проведено экспериментальное и теоретическое исследование процессов теплопереноса и термического разрушения полупрозрачных полимерных и композиционных материалов. Экспериментально показано, что спектральный состав воздействующего излучения играет существенную роль в отношении стабильности теплозащитных свойств высокоотражающих термостойких материалов. На основе экспериментальных исследований выявлены принципиальные особенности механизма термического разрушения полимерных материалов. Показана важность учета структурно-релаксационных

переходов в полимере при анализе тепловых, оптико-физических и теплозащитных характеристик и получены соответствующие количественные оценки.

Установлен факт и условия существования режима однородной релаксации объема полимера при нагреве излучением и показано, что с этим непосредственно связана возможность реализации режима квазистационарного разрушения, что непосредственно играет существенную роль при оценке теплозащитных характеристик материалов по данным лабораторных испытаний. Экспериментально исследованы характеристики различных модификаций политетрафторэтилена (ПТФЭ) — наиболее термостойкого полимерного материала, перспективного для использования в системах тепловой защиты. Впервые реализована контролируемая реакция термического распада ПТФЭ, играющая определяющую роль в механизме разрушения при действии излучения, определены критические условия ее инициирования и разработана модель термического разрушения ПТФЭ с оценкой характерных времен всех стадий процесса.

6. Сформулирован и обоснован подход к решению проблемы создания высокоэффективной огнетеплозащиты объектов для условий экстремальных ситуаций, сопровождающихся горением больших масс вещества и воздействием излучения пламени. Предложен ряд композиций, приведены результаты экспериментальных исследований и сравнительного анализа параметров, характеризующих их теплозащитные свойства. На основе расчетно-теоретического анализа обоснована возможность создания высокоэффективной системы комбинированной огнетеплозащиты и сформулированы рекомендации по ее реализации.

Основное содержание диссертации отражено в опубликованных работах:

1. Товстоног В.А., Мосалов Ф.Ф., Мерзликин В.Г. Постановка и решение задач радиационно-кондуктивного теплообмена в многослойных рассеивающих средах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. – 2008. – № 1. – С. 12–29.
2. Елисеев В.Н., Товстоног А.В., Товстоног В.А. Разработка и сравнительный анализ огнетеплозащиты для условий экстремальных ситуаций // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. – 2005. – № 2. – С. 31–57.
3. Горский В.В., Товстоног В.А. Влияние характера теплового нагружения и оптических свойств на теплообмен в разрушающемся материале // Известия вузов. Машиностроение. – 1978. – № 4. – С. 87–90.
4. Горский В.В., Товстоног В.А. О применении метода моментов к решению уравнения лучистого переноса // Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана. – № 205. – 1976. – С. 70–78.

5. Товстоног В.А. Об определении степени черноты полупрозрачных конструкционных материалов // Известия вузов. Машиностроение. – 1978. – № 6. – С. 61–66.
6. Товстоног В.А., Елисеев В.Н. К расчету оптических характеристик конструкций из полупрозрачных материалов // Известия вузов. Машиностроение. – 1976. – № 2. – С. 102–107.
7. Товстоног В.А. Метод расчета теплообмена излучением в многослойных рассеивающих средах // Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана. – № 495. – 1988. – С. 31–42.
8. Товстоног В.А. Анализ теплообмена в светорассеивающих материалах, нагреваемых излучением // Физика и химия обработки материалов. – 1985. – № 3. – С. 35–40.
9. Товстоног В.А. Теплофизика рассеивающих материалов: прикладные проблемы и решения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. – 2000. – № 3. – С. 67–85.
10. Елисеев В.Н., Товстоног В.А. Теоретические основы расчета сложного теплообмена в элементах конструкций. – М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1982. – 52 с.
11. Горский В.В., Товстоног В.А. Исследование оптических свойств стеклопластиков // Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана. – № 205. – 1976. – С. 88–93.
12. Товстоног В.А. Об определении терморadiационных характеристик рассеивающих материалов по излучательной способности // Теплофизика высоких температур. – 1987. – Т. XXIV, № 1. – С. 170–172.
13. Товстоног В.А. Метод комбинаторной статистической идентификации оптических констант светорассеивающих материалов // Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана. – № 392. – 1982. – С. 47–54.
14. Товстоног В.А. Идентификация терморadiационных характеристик светорассеивающих материалов // Изв. СО АН СССР. Технические науки. – 1987. – Вып. 2. – С. 16–21.
15. Товстоног В.А. Об идентификации терморadiационных характеристик полупрозрачных светорассеивающих материалов // Использование Солнца и других источников энергии в материаловедении. – Киев: Наукова думка, 1983. – С. 91–97.
16. Товстоног В.А. Исследование характеристик лучистого теплопереноса в композиционном материале // Известия вузов. Машиностроение. – 1977. – № 7. – С. 50–54.
17. Товстоног В.А. Оценка корректности расчетной модели теплопередачи в полупрозрачном светорассеивающем материале при нестационарном радиационном нагреве // Известия вузов. Машиностроение. – 1983. – № 11. – С. 42–44.
18. О некоторых особенностях излучения газоразрядных трубчатых источников высокоинтенсивного излучения / В.Н. Елисеев, Е.К. Белоногов, В.А. Товстоног и др. // Известия вузов. Машиностроение. – 1979. – № 11. – С. 152–154.

19. Елисеев В.Н., Товстоног В.А. Характеристики источников излучения и излучательных систем высокоинтенсивного нагрева // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. – 2001. – № 4. – С. 3–32.
20. Теплофизический стенд для испытаний материалов и конструкций при радиационном нагреве / Г.Б. Синярев, В.Н. Елисеев, В.А. Товстоног и др. // Машины, приборы, стенды. Каталог МВТУ им. Н.Э. Баумана. – М.: Внешторгиздат, 1982. – С. 40.
21. Установка лучистого нагрева широкого применения / В.Н. Елисеев, В.А. Товстоног, К.В. Чирин и др. // Вести АН БССР. Физико-энергетические науки. – 1990. – № 2. – С. 93–97.
22. Экспериментальный комплекс для исследований процессов теплообмена и испытаний тепло- и огнезащитных материалов / В.Н. Елисеев, В.Л. Страхов, В.А. Товстоног и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. – 1999. – № 3. – С. 116–120.
23. Товстоног В.А., Чирин К.В., Мерзлякин В.Г. Экспериментальная установка для моделирования комбинированных тепловых воздействий // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. – 2006. – № 2. – С. 62–66.
24. Проблемы радиационного и сложного теплообмена при тепловом моделировании объектов машиностроения / Г.Б. Синярев, В.М. Градов, В.А. Товстоног и др. // Достижения в области радиационного теплообмена. – Минск: ИТМО АН БССР, 1987. – С. 84–94.
25. Экспериментальные исследования термостойкости газофазных вольфрамовых покрытий / В.А. Товстоног, Ю.П. Плотников, А.А. Столяров и др. // Теория и практика газотермического нанесения покрытий. Т. 2. – Рига: Зинатне, 1980. – С. 188–192.
26. Товстоног В.А. Экспериментальные исследования и анализ механизмов термического разрушения армированных пластиков при нагреве излучением // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. – 2007. – № 2. – С. 15–34.
27. Датчики для измерения тепловых потоков большой плотности / В.А. Товстоног, П.В. Тырсин, С.Н. Щугарев и др. // Машины, приборы, стенды. Каталог МВТУ им. Н.Э. Баумана. – М.: Внешторгиздат, 1982. – С. 30.
28. Исследование поглощательной способности покрытий тепловоспринимающей поверхности датчика теплового потока / В.А. Товстоног, В.А. Соловов, С.Н. Щугарев и др. // Промышленная теплотехника. – 1983. – Т. 5, № 1. – С. 81–82.
29. Товстоног В.А. Оценка начальной энергии термического разрушения армированных пластиков при действии излучения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. – 1997. – № 3. – С. 104–115.

30. Оценка погрешности измерения поверхностной температуры полупрозрачного материала контактным датчиком / В.Н.Елисеев, В.И.Воротников, В.А.Товстоног и др. // Известия вузов. Машиностроение. – 1981. – № 11. – С. 77–81.
31. Исследование методической погрешности измерения температуры в полупрозрачных материалах с низкой теплопроводностью / В.Н.Елисеев, В.И.Воротников, В.А.Товстоног и др. // Известия вузов. Машиностроение. – 1982. – № 1. – С. 156–160.
32. Попков И.Н., Товстоног В.А. Анализ теплопереноса в светорассеивающем материале при действии ограниченного источника коллимированного излучения // Изв. СО АН СССР. Технические науки. – 1989. – Вып. 2. – С. 3–8.
33. Попков И.Н., Товстоног В.А. Об определении характеристик поля излучения в светорассеивающем материале при действии ограниченного источника коллимированного излучения // Сибирский физико-технический журнал. – 1991. – Вып. 1. – С. 45–50.
34. Попков И.Н., Селезенев В.А., Товстоног В.А. Радиационно-кондуктивный теплоперенос в рассеивающем материале при действии ограниченного пучка коллимированного излучения. I. Математическая модель и анализ основных закономерностей // Сибирский физико-технический журнал. – 1991. – Вып. 6. – С. 19–23.
35. Товстоног В.А., Попков И.Н., Попкова А.М. Радиационно-кондуктивный теплоперенос в рассеивающем материале при действии ограниченного пучка коллимированного излучения. II. Экспериментальная оценка корректности математической модели // Сибирский физико-технический журнал. – 1992. – Вып. 1. – С. 24–27.
36. Горский В.В., Товстоног В.А. Теплообмен в разрушающемся материале // Известия вузов. Машиностроение. – 1977. – № 1. – С. 9–14.
37. Товстоног В.А. Механизм термического разрушения армированного пластика при высокоинтенсивном нагреве излучением // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Машиностроение. – 1998. – № 4. – С. 43–67.
38. Товстоног В.А. Моделирование теплового режима огнестойких армированных пластиков // Теплофизика высоких температур. – 1993. – Т. 31, № 5. – С. 795–800.
39. Товстоног В.А. Оценка коэффициента теплопроводности разлагающихся материалов при высоких температурах // Теплофизика высоких температур. – 1990. – Т. 28. – № 3. – С. 494–500.
40. Товстоног В.А. Экспериментальное исследование термического разрушения нитрида кремния // Теплофизика высоких температур. – 1993. – Т. 31, № 3. – С. 444–449.
41. Товстоног В.А. Модель высокотемпературных термических превращений политетрафторэтилена // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Машиностроение. – 1997. – № 1. – С. 115–126.

42. Товстоног В.А. Оценка влияния релаксационных процессов на оптические характеристики политетрафторэтилена // Теплофизика высоких температур. – 1988. – Т. 26, № 4. – С. 733–736.
43. Елисеев В.Н., Товстоног В.А. Механизм разрушения и термические превращения полупрозрачных полимеров при нагреве излучением и акустических воздействиях // Тепломассообмен-ММФ. Тепломассообмен в химически реагирующих системах. – Минск: ИТМО, 1988. – С. 53–72.
44. Товстоног В.А. Экспериментальное исследование термических превращений политетрафторэтилена // Теплофизика высоких температур. – 1991. – Т. 29, № 2. – С. 268–274.
45. Товстоног В.А. Оценка огнезащитных свойств светорассеивающих покрытий // Теплофизика высоких температур. – 1993. – Т. 31, № 4. – С. 682–684.

Подписано к печати 03.11.09. Заказ № 665
Объем 1,875 печ.л. Тираж 100 экз.
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5
(499) 263-62-01