

В.Н. Елисеев, В.А. Товстоног

**ТЕПЛООБМЕН  
И ТЕПЛОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ  
МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ  
АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ  
ПРИ РАДИАЦИОННОМ НАГРЕВЕ**

**BAUMANPRESS**  
 **ИЗДАТЕЛЬСТВО**  
МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

Москва  
2014

УДК 536.2:629.78:621.18.062

ББК 31.31

Е51

*Рецензенты:*

заведующий кафедрой «Космические системы и ракетостроение»

Московского авиационного института

чл.-корр. РАН *О.М. Алифанов*;

заместитель директора ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН

чл.-корр. РАН *С.Т. Суржиков*

**Елисеев В. Н.**

Е51 Теплообмен и тепловые испытания материалов и конструкций аэрокосмической техники при радиационном нагреве / В. Н. Елисеев, В. А. Товстоног. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 396, [1] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-3947-8

Монография посвящена проблемам теплообмена и тепловых испытаний материалов и конструкций аэрокосмической техники с использованием источников высокоинтенсивного излучения. Приведены результаты исследований характеристик наиболее перспективных трубчатых источников излучения и примеры их практического применения. Рассмотрены радиационный и радиационно-кондуктивный теплообмен в полупрозрачной рассеивающей среде, наиболее полно учитывающей особенности процессов теплообмена в материалах конструкций летательных аппаратов, а также вопросы теплообмена при тепловых испытаниях и моделировании теплового режима объектов испытаний.

Приведены примеры решения актуальных прикладных задач радиационного и радиационно-кондуктивного теплообмена. Затронуты наиболее важные методические вопросы измерения тепловых потоков и температур.

Для научных работников и инженеров, специализирующихся в области тепловых испытаний и теплофизических исследований объектов ракетно-космической техники. Может быть полезна студентам, обучающимся в вузах авиационного и ракетного профиля.

УДК 536.2:629.78:621.18.062

ББК 31.31

© Елисеев В.Н., Товстоног В.А., 2014

© Оформление. Издательство МГТУ  
им. Н.Э. Баумана, 2014

ISBN 978-5-7038-3947-8

## ПРЕДИСЛОВИЕ

---

---

Развитие ракетной и аэрокосмической техники неразрывно связано с обеспечением прочности и работоспособности конструкций в широком диапазоне температур — от криогенных до предельно высоких, и этим вопросам уделялось значительное внимание с первых лет работы кафедр вузов, занимающихся подготовкой специалистов для ракетно-космической отрасли. Это созданные основоположниками практической космонавтики С.П. Королевым, Ю.А. Победоносцевым и В.П. Мишиным кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители» в МГТУ им. Н.Э. Баумана и «Космические системы и ракетостроение» в МАИ (Национальный исследовательский университет). Не случайно на этих кафедрах в течение многих лет работали коллективы, способствовавшие развитию вопросов теплообмена и теплопрочности ракетно-космических конструкций. В МГТУ им. Н.Э. Баумана развитие этих направлений связано с именами профессоров Г.Б. Синярева и В.С. Зарубина, а также выдающегося ученого в области механики ракетно-космических конструкций и педагога, чл.-корр. АН СССР В.И. Феодосьева.

Один из важнейших вопросов создания ракетно-космических конструкций — их наземная отработка. Развитию этого направления на кафедре «Космические аппараты и ракеты-носители» уделялось значительное внимание. В 1970–80 гг. в Учебно-экспериментальном центре МВТУ им. Н.Э. Баумана был создан комплекс для исследования статической и динамической прочности и тепловых испытаний конструкций. Создание стендовой базы тепловых испытаний неразрывно связано с именем проф. Г.Б. Синярева — первого научного руководителя Учебно-экспериментального центра. Понимая всю сложность наземной отработки конструкций, он предложил оригинальный подход — применить водоохлаждаемые трубочатые источники излучения (ИИ) в режиме многократного

форсирования мощности. И хотя существующие в то время наиболее удобные для практического применения при тепловых испытаниях конструкций ИИИ этого типа, имели мощность не более 15 кВт, что соответствует удельной мощности на единицу длины газоразрядного промежутка всего 75 кВт/м, первые опыты показали реальность такого подхода, но вместе с тем выявили множество технических и научных проблем.

В результате многолетней работы были реализованы технические решения, позволившие создать комплекс стендов и установок радиационного нагрева для испытаний материалов и элементов конструкций ракетно-космической техники с газоразрядными источниками излучения (ГИИ), работающими в режиме многократного (практически до десятикратного) форсирования мощности, а также определить области рационального применения других типов таких источников, включая импульсные, а также трубчатых галогенных ламп накаливания (ГЛН) большой мощности.

Испытание теплонапряженных конструкций при комплексном воздействии высокоэнергетических потоков разной физической природы стимулировало совершенно новое направление — разработку мобильных установок радиационного нагрева большой мощности. Логическим продолжением этих работ стало создание многорежимных установок модульного типа с электрической мощностью единичного трехлампового модуля до 250 кВт, функционирующих в непрерывном и импульсном режимах. Установки такого типа были внедрены на ряде предприятий ракетно-космической отрасли: ЦНИИСМ, ФГУП ЦНИИмаш, ОАО ВПК «НПО машиностроения», ФГУП ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга, ФГУП Московский институт теплотехники. Один из вариантов установки демонстрировался на Международной выставке в Праге (1991 г.).

Одновременно с разработкой установок радиационного нагрева велись работы по научно-методическому обоснованию их практического применения как для тепловых испытаний, так и в технологических процессах. При этом были исследованы возникающие при отработке температурных режимов и тепловой защиты теплонапряженных элементов конструкций процессы, связанные с особенностями теплообмена излучением, например сопряженный радиационно-кондуктивный теплообмен (РКТ) в многоэлементных

системах и РКТ в частично прозрачных оптически неоднородных средах.

Авторы выражают глубокую благодарность сотрудникам Учебно-экспериментального центра (ныне Дмитровский филиал) МГТУ им. Н.Э. Баумана К.В. Чирину, В.А. Селезеву и А.М. Попковой, непосредственно участвовавших в проводимых работах; председателю Национального комитета по тепломассообмену акад. РАН А.И. Леонтьеву и чл.-корр. РАН Ю.В. Полежаеву за постоянное внимание и поддержку в развитии направления разработки и применения источников радиационного нагрева в разных областях практического использования; д-ру техн. наук проф. В.С. Зарубину за внимательный просмотр рукописи и полезные советы, направленные на ее совершенствование, а также рецензентам — чл.-корр. РАН О.М. Алифанову и чл.-корр. РАН С.Т. Суржикову за ценные замечания, сделанные при рецензировании рукописи.

Особую благодарность авторы выражают редактору Е.Н. Ставицкой за большой высокопрофессиональный труд по редактированию рукописи.

## ВВЕДЕНИЕ

---

---

Исследования реакции материалов и конструкций на воздействие высокоинтенсивных тепловых потоков — важная часть проектирования современных летательных аппаратов (ЛА), энергетических установок, высокопроизводительных технологических процессов и т. п. Они также важны при анализе и прогнозировании возможных последствий природных и техногенных катастроф и аварий, сопровождающихся высокоэнергетическим воздействием на окружающую среду и объекты, которое вызывает изменение их состояний. (Под состоянием объекта здесь понимается комплекс его свойств, характеристик и отличительных признаков — физико-химических, геометрических и т. п.)

Один из наиболее распространенных видов передачи энергии в природе, технике и технологии — излучение в ультрафиолетовом (УФ), видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах спектра. Так, практически все биофизические процессы на Земле связаны с прямым или опосредствованным воздействием излучения Солнца. В технологии традиционным стало использование электромагнитного излучения видимого и ближнего ИК-диапазонов для сушки, термообработки и размерной обработки материалов, в процессах микроэлектроники, а в последнее время и в медицине.

Существенно влияние теплообмена излучением в различных энергетических установках, где продукты сгорания топлива являются ИИ, воздействующим на конструктивные элементы и ужесточающим их температурный режим. Весьма показательна проблема теплообмена излучением в аэрокосмической и ракетной областях при разработке баллистических ракет и ракет-носителей. Повышение тяги двигательной установки неизбежно связано с увеличением геометрических параметров факела продуктов сгорания, а следовательно, и плотности потока излучения, падающего на донную часть ракеты. Уже на ракете Р-5 с тягой около 500 кН были

приняты специальные меры по тепловой защите хвостового отсека, а в одной из самых мощных — ракете-носителе «Сатурн-5» с тягой первой ступени  $\sim 35$  МН — до 80 % теплового воздействия на донную часть первой ступени приходится на излучение факела продуктов сгорания, при этом плотность потока излучения достигает  $250 \text{ кВт/м}^2$ , что потребовало разработки достаточно сложной системы тепловой защиты.

Значительное количество энергии в виде излучения может передаваться в окружающую среду при горении (высокотемпературном окислении) различных веществ органического и неорганического происхождения. Температура пламени при сгорании органических соединений достигает  $1\,300 \dots 2\,500 \text{ К}$  и  $3\,000 \dots 3\,500 \text{ К}$  при горении металлов и термитных смесей, вследствие чего значительная доля выделяемой энергии передается во внешнюю среду излучением. Так, в пламени оксида углерода доля излучения составляет около 25 %, при горении напалма — 30...40 %, а бензина — до 40 % от общего тепловыделения. Поэтому проблемы радиационного теплопереноса и воздействия излучения на конструкционные материалы и природную среду имеют исключительно важное практическое значение в задачах зажигания конденсированных веществ и распространения пламени, например, порохов, взрывчатых веществ, полимерных конструкционных материалов; при прогнозировании распространения пожаров и оценке огнестойкости конструкций, а также при разработке методов огне- и теплозащиты технических средств, работоспособность которых должна сохраняться и в экстремальных условиях (пожары, природные и техногенные катастрофы, боевые действия и т. п.).

В ракетной технике эта проблема имеет особое значение в связи с высокой энергонасыщенностью ракет-носителей, запас высокоэнергетического топлива на которых исчисляется сотнями тонн. Так, если на первых баллистических ракетах типа Р-1 масса топлива составляла  $\sim 10$  т, то на ракетах-носителях класса «Восток», «Союз» — 250 т, «Энергия» — около 2 000 т, а «Сатурн-5» — 2 500 т. Если перевести энергетический запас топлива в тротиловый эквивалент, составляющий  $4\,200 \text{ кДж/кг}$ , то соответственно получим 550 т, 4 800 т и 6 000 т (теплота сгорания топлива кислород/керосин равна  $9\,200 \text{ кДж/кг}$ , а кислород/водород —  $13\,400 \text{ кДж/кг}$ ). При быстром неконтролируемом

смешении больших объемов жидкостей с существенно разными температурами кипения (кислород/керосин — 90 К/(400... 500) К, кислород/водород — 90 К/20 К) возникает двухфазная детонирующая смесь, при взрыве которой образуется облако продуктов взрыва и непрореагировавшего топлива диаметром в сотни метров, горение которого (явление огненного шара) приводит к поражению объектов тепловым излучением на расстояниях в сотни метров. Такие случаи неоднократно отмечались при транспортировке и авариях на хранилищах сжиженных газов и являются предметом анализа аварийных режимов запуска тяжелых ракет-носителей.

Исключительно велико значение радиационного нагрева и проблем, связанных с теплообменом излучением, при оценке стойкости конструкций и проектировании технических средств ведения боевых действий в условиях применения ядерного оружия. Это обусловлено тем, что при наземных ядерных взрывах до 30 % выделяемой энергии приходится на излучение присоединенных масс окружающей среды, нагреваемых осколками продуктов деления, и распространяющейся от эпицентра взрыва ударной волной. Высокая интенсивность светового излучения обуславливает значительный поражающий эффект и требует принятия специальных мер защиты от его воздействия, а следовательно, рассмотрения проблем, связанных с влиянием излучения.

Благодаря развитию гелио- и лазерной техники все большее внимание в последние годы уделяется решению проблем, связанных с воздействием коллимированных потоков излучения на природные среды и конструкционные материалы. Основная особенность, позволяющая выделить эти проблемы в особый класс задач, связана, прежде всего, с возможностью получения исключительно высокой плотности потока излучения путем его фокусировки на малой площади. Вместе с тем между гелиотехническими установками или их аналогами с ГИИ и лазерными устройствами существует глубокое различие по характеристикам формируемых ими потоков излучения и взаимодействию со средами сложного структурного строения.

В гелиотехнических установках и установках с искусственными ИИ поток излучения имеет сложное спектральное распределение, соответствующее равновесному спектру используемого

источника, и, согласно оптической теореме, спектральная интенсивность излучения в фокальном пятне не может превысить спектральной интенсивности источника. Следствием этого является тот факт, что плотность потока излучения и температура в фокальном пятне не могут быть больше соответствующих значений у излучателя. Так, в гелиотехнических установках плотность потока излучения и равновесная температура в фокальном пятне не превышают  $15 \dots 30 \text{ МВт/м}^2$  и  $4\,000 \text{ К}$ , а в установках с короткодуговыми ГИИ — соответственно  $6 \dots 12 \text{ МВт/м}^2$  и  $3\,000 \text{ К}$ . Существенно также и то, что поток излучения, формируемый в подобного рода установках, не может передаваться на большие расстояния и производимое им действие ограничивается зоной фокусировки, исчисляемой метрами.

В отличие от установок с широкополосными ИИ излучение лазеров обладает высокой спектральной и пространственной когерентностью (направленностью), вследствие чего становится возможным передача излучения на большие расстояния; его фокусировка на предельно малой площади с характерным размером, соизмеримым с длиной волны излучения, а также получение исключительно высокой плотности воздействующего потока. Широкий диапазон режимов работы установок с лазерными ИИ (от моноимпульсного с пиковой мощностью около  $10 \text{ МВт}$  до непрерывного), относительная простота оборудования для ведения технологических процессов в строго контролируемых условиях, стабильность характеристик и высокая производительность способствуют широкому распространению лазеров в технологических процессах резки, сверления и сварки металлов; раскроя неметаллических материалов, стекол и керамик, а также в различных медицинских приложениях.

Еще одна специфическая область возможного применения лазеров связана с высокой направленностью и малыми потерями при распространении излучения на большие расстояния. Это системы оружия направленной энергии ближнего боя (тактическое, предназначенное для поражения самолетов и низколетящих высокоскоростных ракет) или интегрированные в рамках эшелонированного комплекса противоракетной обороны (ПРО), предназначенные для поражения баллистических ракет на различных этапах траектории полета или в космосе. Например, в 1980-е годы

в качестве одной из полезных нагрузок аэрокосмической системы «Энергия–Буран» рассматривали боевую лазерную систему «Полюс» для поражения спутников вероятного противника (экспериментальный аппарат «Скиф-ДМ»\* (17Ф19ДМ)).

Такое применение лазеров достаточно актуально и ставит целый ряд проблем по взаимодействию излучения с конструкционными материалами в плане как защиты конструкции, так и выбора режимов работы ИИ для наиболее эффективного поражения цели.

Проблемы, связанные с воздействием излучения на объекты, постоянно возникают при организации и проведении тепловых испытаний материалов и конструкций, что связано с широким использованием различных ИИ. Отработка тепловых режимов и получение характеристик, определяющих работоспособность материала или конструкции в условиях высокоинтенсивного теплового нагружения — важнейший этап работ по созданию объектов ракетно-космической техники, двигателестроения, высокотемпературных технологических установок и т. п. Широкое распространение при тепловых испытаниях получили различного рода горелки, жидкостные ракетные двигатели (ЖРД), гиперзвуковые аэродинамические и ударные трубы, электродуговые подогреватели газа, гелиотехнические установки, установки радиационного нагрева с непрерывным спектром и монохроматического излучения — лазеры.

Большинство установок позволяет реализовать тепловое воздействие в узком диапазоне изменения тепловых параметров при существенных ограничениях на размеры нагреваемых объектов (за исключением установок на ЖРД). Чаще всего характерный размер нагреваемой поверхности составляет 0,01...0,1 м, что ограничивает проведение исследований на образцах материалов или малоразмерных моделях. В этом плане наиболее широкие возможности имеют установки радиационного нагрева. Однако успешное применение установок (стендов) радиационного нагрева для тепловых испытаний требует решения ряда технических и методических проблем, связанных с существенно разными условиями натурального и модельного (при лабораторных испытаниях) нагрева объекта испытания (ОИ).

---

\*<http://ruscosmos.narod.ru/KA/glavnaia/polus/polus.htm>

Таким образом, далеко не полный перечень областей науки и техники, в той или иной степени связанных с рассмотрением задач взаимодействия излучения с материалами (объектами), показывает их важное значение и актуальность. Ниже приведены характерные значения плотности потока  $q_r$  излучения применительно к работе различных технических устройств, МВт/м<sup>2</sup>:

Высокоскоростные летательные и спускаемые аппараты .....	$\simeq 1 \dots 100$
Энергетические и технологические установки. ....	$\simeq 0,005 \dots 10$
Тепловые испытания материалов и конструкций с использованием различных ИИ:	
гелиотехнических установок .....	$\simeq 15 \dots 30$
ламп накаливания .....	$\simeq 0,1 \dots 1$
газоразрядных ламп (непрерывный режим/импульсный режим) .....	$\simeq (0,5 \dots 5)/(5 \dots 20)$
квантовых генераторов .....	$> 10^3$
Природные катастрофы и техногенные аварии, сопровождаемые массивными пожарами .....	$\simeq 0,01 \dots 0,015$
Процессы в природной среде и биологических объектах .....	$0,0001 \dots 0,001$

Успешное решение прикладных задач, где в той или иной степени проявляется роль излучения, во многом определяется учетом особенностей, связанных с его взаимодействием с материальной средой.

## Г л а в а 1

# ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ДЕЙСТВИИ ИЗЛУЧЕНИЯ

---

---

### 1.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ТЕПЛООБМЕНА ИЗЛУЧЕНИЕМ

*Излучение* — один из важнейших факторов внешнего воздействия на элементы конструкции высокоскоростных ЛА и других технических устройств как в условиях штатной эксплуатации, так и в экстремальных условиях техногенных аварий и природных катастроф. Вместе с тем в современных конструкциях широкое применение находят так называемые *полупрозрачные* материалы, способные частично пропускать, рассеивать и поглощать падающую на них лучистую энергию. К ним относятся стекло, кварц, различные виды пористой керамики, полимерные и некоторые другие материалы. Для расчета процесса теплообмена в конструкциях, в состав которых входят элементы из указанных материалов, необходимо использовать более общие математические модели, описывающие и теплообмен в конструкциях из непрозрачных материалов (частный случай).

Теплообмен излучением и его взаимодействие с материалом (в общем случае материальной средой) имеет ряд особенностей, отличающих его от других видов переноса энергии. При переносе молекулярной теплопроводностью и конвекцией непосредственными носителями энергии, передаваемой от одного участка среды к другому, являются микрочастицы самой среды. В отличие от этого при теплообмене излучением носителями энергии являются электромагнитные волны (или фотоны), перенос энергии между отдельными телами не связан с наличием материальной среды и может происходить через среду, находящуюся в любом агрегатном состоянии (газообразном, жидком и твердом), а интенсивность теплопереноса определяется оптическими свойствами среды. Кроме

## **Г л а в а 2**

# **ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ И НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ**

---

---

### **2.1. ТРУБЧАТЫЕ ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПРАКТИКЕ ТЕПЛОВЫХ ИСПЫТАНИЙ**

При исследовании процессов взаимодействия излучения с материалами и тепловых испытаниях элементов конструкций важное значение имеют характеристики используемых ИИ и нагревательных устройств. Они необходимы при проектировании нагревательных устройств, планировании и анализе результатов экспериментов. Полнота исследований и их объективность во многом зависят от комплекса характеристик ИИ. Во многом это относится и к установкам радиационного нагрева технологического назначения.

Практика показывает, что ИИ перспективны при теплофизических исследованиях; тепловых и теплопрочностных испытаниях материалов, фрагментов и полномасштабных конструкций. Однако их успешное применение чаще всего связано с решением двух основных задач:

- 1) получение предельно высокой плотности потока излучения на поверхности образца с размерами, отражающими основные особенности макроструктуры материала, при которых сводятся к минимуму неопределенности, связанные с теплообменом образца с окружающей средой;

- 2) нагрев развитых поверхностей по заданному временному закону с известным распределением плотности потока излучения по поверхности.

## Глава 3

# СТЕНДЫ И УСТАНОВКИ РАДИАЦИОННОГО НАГРЕВА

---

---

### 3.1. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СТЕНДЫ

Широкому распространению трубчатых ИИ в теплофизических исследованиях и при тепловых испытаниях конструкций способствует относительная простота оборудования, возможность широкого диапазона регулирования плотности потока излучения и совместной работы с другими источниками теплового и силового воздействия. С учетом рассмотренных характеристик ИИ были разработаны теплофизические стенды и установки радиационного нагрева. Теплофизический стенд содержит системы, обеспечивающие работу ИИ, управление и контроль, измерение и регистрацию параметров эксперимента, а также рабочие участки (рис. 3.1) [147].

Работу ИИ обеспечивают следующие системы: силового электропитания — силовые трансформаторы, пускорегулирующая и коммутирующая аппаратура; гидросистема — контур охлаждения ИИ дистиллированной водой и контур водяного охлаждения элементов конструкции нагревательных устройств (камер, экранов и т. п.); газовая, предназначенная для создания контролируемой атмосферы вокруг нагреваемых объектов и содержащая газобаллонные станции нейтральных ( $N_2$ , Ar) и активных ( $CO_2$ ,  $O_2$ ) газов с пускорегулирующей арматурой; приточно-вытяжной вентиляции.

Система управления и контроля включает в себя контрольно-измерительные приборы и датчики режимных параметров систем стенда (рабочего тока и напряжения, расходов воды и газов, а также времени).

Система измерения и регистрации параметров позволяет проводить многоканальное измерение и регистрацию температуры контактными датчиками, бесконтактное измерение температуры

## Глава 4

# МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

---

---

### 4.1. КАЛОРИМЕТРИЯ ПОТОКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Применение источников радиационного нагрева при тепловых испытаниях материалов и конструкций требует решения ряда вопросов, которые связаны с измерениями параметров, определяющих режим нагрева и объективно отражающих тепловое состояние ОИ. Важнейшие из них — плотность потока падающего излучения (внешнее воздействие), а также температура поверхности и внутренних областей нагреваемого объекта (результат воздействия). От объективности измерения этих параметров во многом зависит достижение целей проводимых тепловых испытаний.

Для высокотемпературных теплофизических исследований характерно интенсивное прохождение процессов, сопутствующих нагреву, в нестационарном и быстропротекающем режимах, поэтому определение теплового потока непосредственно в ходе тепловых испытаний не всегда возможно. Чаще всего плотность теплового потока на различных режимах работы нагревательных устройств находят посредством независимых измерений с использованием датчиков (калориметров) теплового потока.

Поскольку при измерении потоков излучения необходимо учитывать частичное отражение падающего излучения и собственное излучение чувствительного (калориметрического, тепловоспринимающего) элемента, измеренный поток излучения (поток к калориметру) определяют по формуле

$$q_{\text{рез}} = A_{\text{п}} q_{\text{пад}} - \varepsilon_{\text{п}} \sigma_B T_{\text{п}}^4,$$

## Глава 5

# ТЕПЛООБМЕН ПРИ ТЕПЛОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРУБЧАТЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

---

---

### 5.1. РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ГАЗОРАЗЯДНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Успехи в развитии ракетно-космической техники тесно связаны с использованием в конструкциях ЛА конструкционных материалов, отвечающих ряду жестких, иногда трудно выполнимых требований: высокой прочности при малой плотности, коррозионной стойкости при высоких температурах, теплостойкости при действии статических и динамических нагрузок и др.

Исследование характеристик таких материалов и тепловые испытания элементов конструкций ракетно-космической техники на стендах радиационного нагрева с использованием трубчатых ГЛН и ГИИ имеют определенные преимущества по сравнению с другими источниками нагрева благодаря возможности проведения испытаний на образцах достаточно больших размеров или на фрагментах конструкций.

Плотность потока излучения на стендах с ГЛН не превышает  $1,0 \dots 1,2 \text{ МВт/м}^2$ . Более высокий уровень может быть обеспечен при использовании трубчатых водоохлаждаемых ГИИ, которые по сравнению с ГЛН обладают меньшей инерционностью, а площадь поверхности нагрева у них определяется лишь располагаемой электрической мощностью.

Практическое использование ГИИ в целях тепловых испытаний связано с некоторыми особенностями, которые отличают их от ГЛН. По ряду причин расположение ГИИ над поверхностью ОИ

## Глава 6

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ОБЪЕКТА ИСПЫТАНИЙ

---

---

### 6.1. ВЫБОР РАЗМЕРОВ ОБРАЗЦА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ОГНЕСТОЙКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Материалы на органическом связующем, армированные неорганическими волокнами, широко применяют в конструкциях ЛА, транспортных средств и др. [237, 238]. Основное требование к ним — сохранение в течение определенного времени несущей способности при высокоинтенсивном нагреве [239], реализуемом в экстремальных ситуациях, например при техногенных или природных пожарах. Для моделирования тепловых режимов при исследовании свойств таких материалов часто используют установки лучистого нагрева и, как правило, образцы относительно малых размеров. Можно выделить две характерные стадии нагрева образца, на которых проявляется влияние масштабных факторов: нагрев до температуры термической деструкции и нагрев, сопровождающийся разложением связующего и горением газообразных продуктов деструкции.

На первой стадии одномерность температурного поля в исследуемой области образца ограниченных размеров может быть нарушена в связи с теплообменом на его боковых (необогреваемых) поверхностях. В этом случае для правильного выбора размеров образца необходимо знать, как далеко распространяется искажение температурного поля, вызванное тепловым фактором.

Вторая стадия нагрева композиционного материала на органическом связующем сопровождается физико-химическими процессами с образованием продуктов разложения. Например, при

## ТЕПЛООБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ В ПОЛУПРОЗРАЧНЫХ СРЕДАХ

---

---

### 7.1. РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТОДОМ МОМЕНТОВ

#### 7.1.1. Основные соотношения метода моментов

Решение задачи переноса энергии излучения даже в случае плоской геометрии сводится к интегрированию уравнения (1.35) для каждого из множества направлений, определяемых полярным углом  $\vartheta$ , что весьма трудоемко и громоздко. Однако в практических приложениях интерес представляет не интенсивность излучения, а интегральные характеристики его поля — плотность потока и объемная плотность энергии излучения. Это позволяет с использованием обоснованных допущений заменить решение точного интегродифференциального уравнения переноса излучения решением уравнений относительно *интегральных* характеристик поля излучения. Сформулировать их можно или на основе физических допущений, или в результате математических операций преобразования исходного интегродифференциального уравнения. Одним из таких методов является метод моментов, впервые предложенный М. Круком [248], развитый на случай рассеивающей среды с произвольными оптическими свойствами [249–254] и использованный для решения ряда прикладных задач [1, 2, 15, 255–259].

Рассмотрим общий случай поглощающей, излучающей и рассеивающей среды, освещенной протяженными монохроматическим диффузным и направленным ИИ. Примем, что по толщине слоя коэффициент удельного рассеяния  $\gamma = \sigma/\varepsilon$  и индикатриса рассеяния  $\rho(\beta)$  постоянны, а коэффициент поглощения изменяется. На границе слоя допускаем произвольный закон отражения излучения.

## **Глава 8**

# **ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ РАДИАЦИОННОГО И РАДИАЦИОННО-КОНДУКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА**

---

---

### **8.1. НЕСТАЦИОНАРНЫЙ НАГРЕВ ПОЛУПРОЗРАЧНОГО ТЕПЛОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ**

Задачи радиационного и радиационно-кондуктивного теплообмена в том или ином виде всегда сопутствуют созданию ракетно-космических конструкций. Это обусловлено широким использованием неметаллических конструкционных материалов, как правило, проявляющих свойство частичной прозрачности по отношению к излучению, а также распространенностью условий теплообмена в конструкциях с определяющим или превалирующим воздействием излучения. В простейших постановках таких задач обычно не учитывают частичную прозрачность материала по отношению к излучению внешних источников и взаимосвязь полей излучения и температуры в нагреваемом объекте. Тем не менее их решение имеет практическое значение при импульсных режимах воздействия потока излучения; при расчетах температурного состояния конструкций из материалов, не допускающих высокотемпературного нагрева; при приближенных оценках температурного состояния и т. п. В более сложных случаях возможен учет взаимосвязи полей излучения и температуры, структурного строения среды, нестационарности условий нагрева, физико-химических превращений и т. д. При этом на первый план выходит эффективность расчетных алгоритмов, адекватность используемых моделей реальным процессам, а также достоверность данных об оптико-физических свойствах среды и условиях теплового воздействия.

Основное назначение теплозащитного покрытия — обеспечить работоспособность конструкции и приемлемый температурный ре-

## ЛИТЕРАТУРА

---

---

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. Сер. 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. Сер. Машиностроение. 2005. № 2. С. 31–57.
3. *Новицкий Л.А., Степанов Б.М.* Оптические свойства материалов при низких температурах. М.: Машиностроение, 1980. 224 с.
4. *Гуревич М.М., Середенко М.М.* Оптические свойства лакокрасочных покрытий. Л.: Химия, 1984. 120 с.
5. *Вьдрик Г.А.* Прозрачная керамика. М.: Энергия, 1980. 96 с.
6. *Мельников Ю.Ф.* Светотехнические материалы. М.: Высш. шк., 1976. – 151 с.
7. *Литовский Е.Я., Пучкевич Н.А.* Теплофизические свойства огнеупоров. М.: Металлургия, 1982. 149 с.
8. *Кудинов В.В., Пузанов А.А., Замбржицкий А.П.* Оптика плазменных покрытий. М.: Наука, 1981. 188 с.
9. *Сперанская Т.А., Тарутина Л.И.* Оптические свойства полимеров. Л.: Химия, 1976. 136 с.
10. *Золотарев В.М.* Оптические постоянные природных и технических сред. Л.: Химия, 1984. 215 с.
11. *Рвачев В.П.* Методы оптики светорассеивающих сред в физике и биологии. Минск: Изд-во БГУ, 1978. 240 с.
12. *Ильясов С.Г., Красников В.В.* Физические основы инфракрасного облучения пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1978. 359 с.
13. *Хайруллина А.Я.* Исследование биоклеток методами светорассеяния // Распространение света в дисперсной среде. Минск: Наука и техника, 1982. С. 275–293.
14. *Иванов А.П.* Физические основы гидрооптики. Минск: Наука и техника, 1975. 503 с.

15. Горский В.В., Товстоног В.А. Влияние характера теплового нагружения и оптических свойств на теплообмен в разрушающемся материале // Изв. вузов. Машиностроение. 1978. № 4. С. 87–90.
16. Сибиряков В.А. К расчету сложного теплообмена в стекломассе при варке стекла в ванной печи // Производство и исследование стекла и силикатных материалов. Ярославль: Верхневолжское изд-во, 1976. С. 38–42.
17. Пигальская Л.А. О температурных полях в оптических монокристаллах при высоких температурах // Кристаллография. 1969. Т. 14, № 2. С. 347, 348.
18. Горяинов Л.А. Исследование процессов тепло- и массопереноса при получении монокристаллов // Массо- и теплоперенос в технологических процессах. М.: Изд-во МИИТ, 1981. 18 с.
19. Адзериho А.А., Ноготов Е.Ф., Трофимов В.П. Радиационный теплообмен в двухфазных средах. Минск: Наука и техника, 1987. 166 с.
20. Журавлев Ю.А. Радиационный теплообмен в огнетехнических устройствах. Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та, 1983. 256 с.
21. Блох А.Г. Теплообмен в топках паровых котлов. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.
22. Блох А.Г. Тепловое излучение в котельных установках. Л.: Энергия, 1967. 326 с.
23. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 592 с.
24. Шишков А.А., Панин С.Д., Румянцев Б.В. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива. М.: Машиностроение, 1989. 240 с.
25. Суржиков С.Т. Кинетика и газодинамика горения слоевого твердого топлива // Законы горения; Под. ред. Ю.В. Полежаева. М.: УНПЦ «Энергомаш», 2006. С. 236–275.
26. Мартин Дж. Вход в атмосферу. М.: Мир, 1969. 320 с.
27. Отработка и испытания теплозащиты космических кораблей. М.: ЦНТИ «Поиск», 1978. 132 с.
28. Макалис С., Мэйдью Р.К. Расчет теплозащиты высокоскоростных ракет // Аэрокосмическая техника. 1985. Т. 3, № 11. С. 146–153.
29. Репринцева С.М., Федорович Н.В. Лучистый теплообмен в дисперсных средах. М.: Наука и техника, 1968. 140 с.
30. Комаровская Н.В. Экспериментальные исследования переноса тепла излучением в рыхловолокнистом теплоизоляторе // ИФЖ. 1974. Т. 26, № 3. С. 529–532.
31. Дульнев Н.Г., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия, 1974. 264 с.

32. Эрио Н.Д., Гликсман Л.Р. Экспериментальное и теоретическое исследование совместного переноса тепла излучением и теплопроводностью в расплавленном стекле // Теплопередача. 1972. № 2. С. 109–117.
33. Сергеев О.А., Мень А.А. Теплофизические свойства полупрозрачных материалов. М.: Изд-во стандартов, 1977. 288 с.
34. Сергеев О.А., Шаишков А.Г. Теплофизика оптических сред. Минск: Наука и техника, 1983. 232 с.
35. Мень А.А. Теоретические аспекты определения теплопроводности полупрозрачных веществ // ТВТ. 1975. Т. 11, № 2. С. 290–299; № 4. С. 762–767.
36. Марченко Н.В. Задача Стефана при радиационно-кондуктивном теплообмене в плоском слое селективной полупрозрачной среды // ТВТ. 1982. Т. 20, № 5. С. 897–905.
37. Хабиб И.С. Затвердевание полупрозрачной цилиндрической среды при совместном действии теплопроводности и излучения // Теплопередача. 1973. № 1. С. 39–43.
38. Abrams M., Viskanta R. The effects of radiative heat transfer the melting and solidification of semitransparent crystals // J. Heat Transfer. 1974. Vol. 96, no. 2. P. 184–190.
39. Mc.Mahon H.O. Thermal radiation characteristics of some glasses // J. Am. Ceram. Soc. 1951. Vol. 34, no. 3. P. 91–96.
40. Приходько Л.В., Багдасаров Х.С. Определение коэффициента поглощения при высоких температурах // Журнал прикладной спектроскопии. 1970. Т. 12, № 2. С. 264–269.
41. Петров В.А., Марченко Н.В. Перенос энергии в частично прозрачных твердых телах. М.: Наука, 1985. 189 с.
42. Каданов Л.П. Распространение лучистой энергии внутри аблирующего тела // Теплопередача. 1961. Т. 83, № 2. С. 147–160.
43. Boles M., Ozisik M.H. Semultaneous ablation and radiation in an absorbing, emitting and isotropically scattering medium // J. Quant. Spectr. Rad. Transfer. 1972. No. 12. P. 839–847.
44. Горский В.В., Штыря А.С. Об использовании экспериментов по уносу массы для определения свойств плавленного кварца при высоких температурах // ИФЖ. 1985. Т. 49, № 3. С. 374–378.
45. Алифанов О.М. Математическое моделирование сложного теплообмена в дисперсных материалах // ИФЖ. 1985. Т. 49, № 5. С. 781–791.
46. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975. 934 с.
47. Суржиков С.Т. Тепловое излучение газов и плазмы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 544 с.

48. *Адрианов В.Н.* Основы радиационного и сложного теплообмена. М.: Энергия, 1972. 464 с.
49. *Оцисик М.Н.* Сложный теплообмен. М.: Мир, 1976. 616 с.
50. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 285 с.
51. *Гинзбург А.С.* Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1973. 528 с.
52. *Рабинович Г.Д., Слободкин Л.С.* Терморadiационная и конвективная сушка лакокрасочных покрытий. Минск: Наука и техника, 1966. 172 с.
53. *Левитин И.Б.* Применение инфракрасной техники в народном хозяйстве. Л.: Энергия, 1981. 264 с.
54. *Вендик О.Г.* Корпускулярно-фотонная технология. М.: Высш. шк., 1984. 240 с.
55. *Мачулка Г.А.* Лазерная обработка стекла. М.: Сов. радио, 1979. 134 с.
56. *Справочник по технологии лазерной обработки / Под ред. В.С. Коваленко.* Киев: Техника, 1985. 167 с.
57. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.
58. *Ларкина Л.П.* Применение лучистой энергии оптического диапазона для разрушения горных пород. Киев: Наукова думка, 1976. 108 с.
59. *Зворыкин Д.Б., Прохоров Ю.И.* Применение лучистого инфракрасного нагрева в электронной промышленности. М.: Энергия, 1980. 176 с.
60. *Зворыкин Д.Б., Александрова А.Т., Байкальцев Б.П.* Отражательные печи инфракрасного нагрева. М.: Машиностроение, 1985. 176 с.
61. *Стержанов Н.И.* Расчет температурных полей в кремниевой пластине при оптическом импульсном отжиге // ИФЖ. 1982. Т. 43, № 3. С. 463–467.
62. *Зелто О.* Принципы лазеров. М.: Мир, 1984. 395 с.
63. *Жорина Л.В., Змиевской Г.Н.* Основы взаимодействия физических полей с биологическими объектами. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 238 с.
64. *Григорьев Б.А.* Импульсный нагрев излучениями. М.: Наука, 1974. Т. 1. 319 с.
65. Лазеры в технологии / Под ред. М.Ф. Стельмаха. М.: Энергия, 1975. 216 с.
66. *Соболь Э.Н., Углов А.А.* Лазерная обработка горных пород // ФХОМ. 1983. № 2. С. 3–17.

67. Рыкалин Н.Н. Лазерная обработка материалов. М.: Машиностроение, 1975. 296 с.
68. Рэди Дж. Действие мощного лазерного излучения. М.: Мир, 1974. 468 с.
69. Анисимов С.И. Действие излучения большой мощности на металлы. М.: Наука, 1970. 272 с.
70. Демиденко Л.М. Высокоогнеупорные композиционные покрытия. М.: Металлургия, 1979. 216 с.
71. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. М.: Энергия, 1976. 392 с.
72. Панкратов Б.М., Полежаев Ю.В., Рудько А.К. Взаимодействие материалов с газовыми потоками. М.: Машиностроение, 1976. 224 с.
73. Панкратов Б.М. Спускаемые аппараты. М.: Машиностроение, 1984. 232 с.
74. Никитин А.Т., Лошкарев В.А. Теплозащитные покрытия в динамике сплошных сред. Ростов: Изд-во Ростовского ун-та, 1982. 252 с.
75. Душин Ю.А. Работа теплозащитных материалов в горячих газовых потоках. Л.: Химия, 1968. 224 с.
76. Юдаев Б.Н., Михайлов М.С., Савин В.К. Теплообмен при взаимодействии струй с преградами. М.: Машиностроение, 1977. 248 с.
77. Горский В.В., Суржиков С.Т. Об общей методологии решения сопряженной задачи нагрева и уноса массы материалов в селективно излучающих газовых потоках // Тр. IV Всесоюз. конф. «Динамика излучающего газа». М.: Изд-во МГУ, 1981. Т. 2. С. 16–23.
78. Анфимов Н.А., Румынский А.Н. Лучисто-конвективный теплообмен и теплозащита космических аппаратов, спускаемых на поверхность Земли и других планет солнечной системы // Проблемы механики и теплообмена в космической технике. М.: Машиностроение, 1982. С. 54–81.
79. Surzhikov S., Shang J. Radiative and Convective Heating of ORION Space Vehicles at Earth Orbital Entries: 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 4–7 January 2011. American Institute of Aeronautics and Astronautics. Orlando, Florida. AIAA 2011–251.
80. Бойко А.Н. Применение лучезащитных экранов на основе газозвесей дисперсных сред для повышения радиационной теплостойкости элементов конструкций // Исследование материалов в условиях лучистого нагрева. Киев: Наукова думка, 1975. С. 65–73.
81. Юревич Ф.Б. Экранирование излучения из невязкой части сжатого слоя двухфазными продуктами разрушения графита // Использование Солнца и других источников лучистой энергии в материаловедении. Киев: Наукова думка, 1983. С. 81–91.

82. *Peng T.C.* An oxidative erosion study of carbon composites with high-speed photography // AIAA Papers. 1979. No. 375. P. 1–9.
83. *Энджел Ц.Д.* Вязкий гиперзвуковой сжатый слой при наличии излучения и абляции // Ракетная техника и космонавтика. 1973. Т. 11, № 8. С. 147–156.
84. *Хошидзаки Х., Лэшер Л.* Конвективный и лучистый теплообмен на поверхности тела с уносом массы // Ракетная техника и космонавтика. 1968. Т. 6, № 8. С. 3–13.
85. *Ван-де-Хюльст Г.* Рассеяние света малыми частицами. М.: ИЛ, 1961. 536 с.
86. *Борен К., Хафмен Д.* Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1996. 660 с.
87. *Петерсон Д.Л., Нахтсгейм П.Р., Хоув Дж.* Применение отражающих аблирующих материалов для теплозащиты аппаратов, входящих в атмосферу планет // Ракетная техника и космонавтика. 1972. Т. 10, № 11. С. 137–145.
88. *Congdon W.* Investigation of reflecting heat-shield materials for outer-planet mission // AIAA Paper. 1974. No. 702. P. 1–13.
89. *Фристром Р.М., Вестенберг А.А.* Структура пламени. М.: Металлургия, 1969. 363 с.
90. *Herman R.T.* In chemical rockets and flame and explosive technology // N. Y. : M. Dekker, 1969. 390 p.
91. *Блинов В.И., Худяков Г.Н.* Диффузионное горение жидкостей. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 208 с.
92. *Гришин А.М., Грузин А.Д., Зверев В.Г.* Исследование структуры и пределов распространения фронта верхового лесного пожара // ФГВ. 1985. Т. 21, № 1. С. 11–21.
93. *Суржиков С.Т.* Радиационные тепловые потоки вблизи кислородно-керосиновых огневых шаров. // ТВТ. 1997. Т. 35, № 5. С. 778–782.
94. *Виллонов В.Н., Сидонский О.Б.* К вопросу о зажигании конденсированных систем лучистой энергией // ФГВ. 1965. № 4. С. 39–43.
95. *Виллонов В.Н.* Воспламенение пироксилина световым потоком высокой интенсивности // Горение и взрыв. Сб. статей. М.: Наука, 1977. С. 278–281.
96. *Страковский Л.Г., Фролов Е.И.* Особенности зажигания полупрозрачных летучих ВВ монохроматическим тепловым потоком // ФГВ. 1980. № 5. С. 140–147.
97. *Рубцов Н.А.* Некоторые вопросы комбинированного теплообмена / Сб. Теплообмен излучением: Сб. статей. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1977. С. 8–23.

98. *Алешин В.В., Селезнев В.Е., Фотин С.В.* Численный анализ пожарной опасности магистральных газопроводов. М.: Едиториал УРСС, 2004. 327 с.
99. *Фотин С.В.* Численный анализ зон теплового поражения при авариях на магистральных газопроводах // Сб. тр. III конф. пользователей CFL-FEM GmbH; Под ред. А.С. Шадского. М.: Полигон-пресс, 2003. С. 382–389.
100. *Ласло Т.* Оптические высокотемпературные печи. М.: Мир, 1968. 380 с.
101. *Лопатина Г.Г., Сасоров В.П.* Оптические печи. М.: Metallurgia, 1969. 215 с.
102. *Никифоров Г.Д.* Применение лучистого нагрева для сварки, пайки и плавки различных материалов // Исследования материалов в условиях лучистого нагрева: Киев: Наукова думка, 1975. С. 12–20.
103. *Дверняков В.С.* Кинетика высокотемпературного разрушения материалов. Киев: Наукова думка, 1981. 152 с.
104. Technical Survey. Pentagon study laser battle station in space // *Aviat. Week and Space Techn.* 1980. Vol. 113, no. 4. P. 57–62.
105. Системы противоракетной обороны: средства борьбы против баллистических ракет <http://www.liveinternet.ru/community/3554304/post119741515/> (January 30, 2010).
106. *Robinson C.D.* Beam weapon advances emerge // *Aviat. Week and Space Techn.* 1983. Vol. 119, no. 3. P. 18–21.
107. US effort redirected to high energy laser // *Aviat. Week and Space Techn.* 1980. Vol. 113, no. 4. P. 50–57.
108. Laser technology – development and application. US Senate Committee on Commerce, science and transportation: Subcommittee on science, technology and space // 96th Congress US GAO Printing Office. Washington, 1980. Ser. No 96. P. 126–269.
109. Технический перевод: Материалы по проблемам разработки лучевого оружия. М.: ГОНТИ-8, 1980. 180 с.
110. *Gebhardt F.* High power laser propagation // *Applied Optics.* 1976. Vol. 5, no. 6. P. 1479–1493.
111. *Амimoto С.Т.* Пробой, вызываемый импульсом лазера на DF при наличии морского аэрозоля // *Аэрокосмическая техника.* 1985. Т. 3, № 9. С. 8–15.
112. *Ораевский А.Н.* Химические лазеры: новые результаты и идеи // *Известия АН СССР. Сер. Физическая.* 1980. Т. 44, № 8. С. 1554–1565.
113. *Зуев В.Е.* Распространение лазерного излучения в атмосфере. М.: Радио и связь, 1981. 288 с.

114. *Елецкий А.В.* Эксимерные лазеры // УФН. 1978. Т. 125, № 2. С. 279–314.
115. *Спрэнгл Ф., Коффи Т.* Новые источники мощного когерентного излучения // УФН. 1985. Т. 146, № 2. С. 303–316.
116. *Зарубин В.С.* Математическое моделирование в технике. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 496 с.
117. Основные данные иностранных аэродинамических труб и газодинамических установок. М.: ОНТИ ЦАГИ, 1974. 206 с.
118. Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского. Экспериментальная база. URL: <http://www.tsagi.ru/rus/base/>
119. ОАО НПО «Молния». Лабораторно-испытательная база. Лаборатория криотермовакuumных испытаний. URL: <http://www.promolnija.ru/labs/kriotermlab.php>
120. Научно-испытательный центр ракетно-космической промышленности. URL: <http://nic-rkp.ru/default.asp?page=about>
121. ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша». Экспериментальная база. URL: <http://kerc.msk.ru/>
122. Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН. Экспериментальная база. Аэродинамические установки. URL: <http://www.itam.nsc.ru/>
123. *Третьяченко Г.Н., Федчук В.К.* Установка для исследования элементов конструкций в сверхзвуковом потоке, содержащем контролируемое число абразивных частиц // Проблемы прочности. 1972. № 5. С. 112–113.
124. А.с. 323707 СССР. Стенд для исследования термостойкости образцов, материалов и элементов конструкций в газовом потоке / А.П. Ворошенко, В.С. Писаренко. 1971. Бюл. № 1.
125. Аэродинамические трубы и установки НИЦ им. Эймса. М.: ОНТИ ЦАГИ, 1974. № 450. 68 с.
126. Аэродинамические трубы с электродуговыми подогревателями. М.: БНТИ ЦАГИ, 1970. № 334. 62 с.
127. *Харитонов А.М.* Техника и методы аэрофизического эксперимента. Аэродинамические трубы и газодинамические установки. Новосибирск: НГТУ, 2005. 220 с.
128. *Поуп А., Гойн К.* Аэродинамические трубы больших скоростей. М.: Мир, 1968. 504 с.
129. *Юревич Ф.Б., Куликов В.С.* Электродуговой нагрев газа. Минск: Наука и техника, 1973. 193 с.

130. *Георгиев С.* Сравнение различных экспериментальных установок с точки зрения моделирования процессов теплового разрушения материалов // *Техника гиперзвуковых исследований*. М.: Мир, 1964. С. 484–522.
131. *Уоррен В., Диационис Н.* Моделирование гиперзвуковых условий с помощью воздушной электрической дуги // *Исследование гиперзвуковых течений*. М.: Мир, 1964. С. 470–499.
132. *Полежаев Ю.В., Шишков А.А.* Газодинамические испытания тепловой защиты. М.: Промедэк, 1992. 248 с.
133. *Пасичный В.В., Шевченко А.В., Дверняков В.С.* Гелиоустановка для исследования тугоплавких окисных соединений / *Гелиотехника*. 1968. № 2. С. 58–61.
134. *Дувез П.* Использование солнечных печей при высокотемпературных исследованиях // *Солнечные высокотемпературные печи*. М.: ИЛ, 1960. С. 59–70.
135. *Никифоров Г.Д., Опарин М.М., Лопатина Г.Г.* Применение лучистого нагрева для сварки, пайки и плавки различных материалов / Сб. *Исследование материалов в условиях лучистого нагрева*. Киев: Наукова думка, 1975. С. 12–20.
136. *Карпунин В.Т., Маликов М.М., Монахов Н.В.* Исследование разрушения композиционных материалов лазерным излучением в вакууме и при атмосферном давлении воздуха // *ФХОМ*. 1991. № 3. С. 38–43; № 6. С. 58–65.
137. *Tovstonog V.A.* An Experimental Study of the Thermal Decomposition of Silicon Nitride // *High Temperature*. 1993. Vol. 31, no. 3. P. 401–406.
138. *Howe J.T., Pitts W.S., Lundell J.H.* Survey of the supporting research and technology for the thermal protection of the Galileo probe // *AIAA Paper*. 1981. No 1068. 15 p.
139. *Синярев Г.Б.* Общие принципы и организация стендовых тепловых испытаний // *Тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана*. 1982. № 392. С. 3–16.
140. *Андрейчук О.Б., Малахов Н.Н.* Тепловые испытания космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1982. 143 с.
141. Статические испытания на прочность сверхзвуковых самолетов / А.Н. Баранов, Н.Г. Белозеров, Ю.С. Ильин, В.В. Кузьминов. М.: Машиностроение, 1974. 344 с.
142. *Новицкий Л.А.* Установки для имитации условий теплообмена летательных аппаратов в космосе // *ТВТ*. 1969. Т. 7, № 5. С. 997–1005.
143. *Вассерман А.Л.* Ксеноновые трубчатые лампы и их применение. М.: Энергоатомиздат, 1989. 88 с.
144. Газоразрядные источники высокоинтенсивного оптического излучения // *Каталог в/о «Электроноргтехника»*. М.: Внешторгиздат, 1989. 65 с.

145. *Никитин П.В.* Тепловая защита. М.: Изд-во МАИ, 2006. 512 с.
146. О некоторых особенностях излучения газоразрядных трубчатых источников высокоинтенсивного излучения / В.Н. Елисеев, Е.К. Белоголов, В.А. Соловов, В.А. Товстоног // Изв. вузов. Машиностроение. 1979. № 11. С. 152–154.
147. Теплофизический стенд для испытаний материалов и конструкций при радиационном нагреве / Г.Б. Сиярев, В.Н. Елисеев, В.А. Товстоног, В.А. Селезнев // Машины, приборы, стенды. Каталог. М.: Внешторгиздат, 1982. С. 40.
148. Установка лучистого нагрева широкого применения / В.Н. Елисеев, В.А. Товстоног, К.В. Чирин и др. // Вести АН БССР. Сер. Физико-энергетические науки. 1990. № 2. С. 93–97.
149. *Товстоног В.А., Тырсин П.В., Щугарев С.Н.* Датчики для измерения тепловых потоков большой плотности // Машины, приборы, стенды. Каталог. М.: Внешторгиздат, 1982. С. 30.
150. *Тиркельтауб М.В.* Кварцевые инфракрасные лампы // Светотехника. 1962. Т. 32, № 8. С. 12–17.
151. *Сиярев Г.Б., Градов В.М., Товстоног В.А.* Проблемы радиационного и сложного теплообмена при тепловом моделировании объектов машиностроения // Достижения в области радиационного теплообмена: Проблемные доклады VI Всесоюз. конф. по радиационному теплообмену, Каунас, 1987. М.: Минск, 1987. ИТМО АН БССР. С. 84–94.
152. *Сиярев Г.Б.* Исследование теплообмена и тепловые испытания теплонапряженных узлов машин с использованием высокоинтенсивного излучения (некоторые итоги и перспективы работы) // Вопросы теплообмена и тепловых испытаний конструкций. Тр. МВТУ. М.: Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1988. № 495. С. 4–14.
153. Применение низкотемпературной плазмы в процессах технологии стекла / А.В. Болотов, В.П. Прянишников, А.Л. Вассерман и др. // Физика и химия обработки материалов. 1979. № 6. С. 89–90.
154. *Елисеев В.Н., Товстоног В.А.* Расчет сложного теплообмена в элементах конструкций: Учеб. пособ. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1984. 48 с.
155. *Елисеев В.Н., Товстоног В.А.* Характеристики источников излучения и излучательных систем высокоинтенсивного нагрева // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. 2001. № 4. С. 3–32.
156. Экспериментальный комплекс для исследований процессов тепло-массообмена и испытаний тепло- и огнезащитных материалов / В.Н. Елисеев, В.Л. Страхов, В.А. Товстоног, В.Н. Атаманов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 1999. № 3. С. 116–120.

157. *Товстоног В.А., Чирин К.В., Мерзлякин В.Г.* Экспериментальная установка для моделирования комбинированных тепловых воздействий // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2006. № 2. С. 62–66.
158. *Елисеев В.Н., Товстоног В.А.* Анализ технических возможностей создания высокоэффективных установок радиационного нагрева для тепловых испытаний объектов аэрокосмической техники // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. № 1. С. 57–70.
159. Экспериментальные исследования термостойкости газофазных вольфрамовых покрытий / В.А. Товстоног, Ю.П. Плотников, А.А. Столяров и др. // Теория и практика газотермического нанесения покрытий: Тез. докл. VIII Всесоюзн. совещания. Рига: Зинатне, 1980. Т. 2. С. 188–192.
160. *Титов А.В., Круковский П.Г., Товстоног В.А.* Определение теплотехнических свойств графитовых материалов методами обратных задач теплопроводности с использованием радиационного нагрева // Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации, 1985. М.: Наука, 1986. С. 164.
161. Экспериментально-теоретическое исследование и моделирование теплового и напряженно-деформированного состояния многослойной осесимметричной конструкции / Г.Б. Синярев, В.С. Зарубин, В.А. Товстоног и др. // Методы и средства машинной диагностики газотурбинных двигателей. Харьков: ХАИ, 1983. Т. 2. С. 72–73.
162. Постановка и некоторые результаты стендовых испытаний теплонапряженных элементов конструкций / Г.Б. Синярев, З.Г. Алпаидзе, В.А. Товстоног и др. // Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации, 1983–84 гг. М.: Наука, 1985. С. 164.
163. Завод испытательных машин. URL: [www.pkczim.ru](http://www.pkczim.ru)
164. «Точприбор» — производитель испытательных машин. URL: [www.tochpribor](http://www.tochpribor)
165. Представительство MTS — производителя испытательной техники (США). URL: [www.mts.com](http://www.mts.com)
166. Материалы для электротермических установок: Справ: пособ. М.: Энергоатомиздат, 1987. 295 с.
167. Экспериментальный комплекс для теплопрочностных испытаний материалов и элементов конструкций при высокоинтенсивном нагреве / В.А. Товстоног, В.И. Томак, С.В. Цветков, К.В. Чирин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2009. № 1. С. 67–76.
168. *Лукашевич В.П., Труфакин В.А., Микоян С.А.* Воздушно-орбитальная система «Спираль». URL: <http://www.buran.org>

169. Microcraft/NASA X-43 Hyper-X. URL: <http://airwar.ru/enc/xplane/x43.html>
170. URL: <http://www.testpilot.ru/russia/tsiam/igla/igla.htm>
171. *Евстафьев М.Д.* Долгий путь к «Буре». М.: Вузовская книга, 1999. 58 с.
172. *Артемов О.А.* Прямоточные воздушно-реактивные двигатели. М.: Изд-во МАИ, 2002. 300 с.
173. URL: <http://www.testpilot.ru/russia/raduga/d2/d2.htm>
174. *Полежаев Ю. В.* Быть или не быть гиперзвуковому самолету? // ИФЖ. 2000. Т. 73, № 1. С. 5–10.
175. *Железнякова А.Л., Суржиков С.Т.* Численное моделирование гиперзвукового обтекания модели летательного аппарата X-43 // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2010. № 1. С. 3–19.
176. *Бюшгенс Г.С., Дмитриев В.Г.* Аэромеханика и газовая динамика // О работах ЦАГИ. 1970–2000 годы и перспективы: Сб. статей. 2001. № 2. С. 81–98.
177. *Петров В.А.* Излучательная способность высокотемпературных материалов. М.: Наука, 1969. 204 с.
178. *Абрамович Б.Г., Гольдштейн В.Л.* Интенсификация теплообмена излучением с помощью покрытий. М.: Энергия, 1977. 256 с.
179. 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.
180. Датчики для измерения тепловых потоков большой плотности / В.А. Товстоног, П.В. Тырсин, С.Н. Щугарев и др. // Каталог «Машины, приборы, стенды МВТУ». М.: Внешторгиздат, 1982. С. 30.
181. *Лыков А.В.* Тепломассообмен. М.: Энергия, 1972. 560 с.
182. *Омельченко К.Г., Иванова К.К.* Методика расшифровки показаний датчиков лучистых тепловых потоков // ТВТ. 1976. Т. 14, № 5. С. 1122–1124.
183. *Gardon R.* An instrument for the direct measurement of thermal radiation // Review of Scientific Instrument. 1953. Vol. 24, no. 5. P. 366–370.
184. *Эш Р.Л.* Характеристики датчиков теплового потока из тонкой фольги // Ракетная техника и космонавтика. 1969. Т. 7, № 12. С. 179–182.
185. *Кирхгоф Р.Х.* Характеристики датчика Гардона конечной толщины для измерения теплового потока // Теплопередача. 1972, № 2. С. 130–131.

186. *Геращенко О.А., Федоров В.Г.* Тепловые и температурные измерения. Киев: Наукова думка, 1965. 304 с.
187. *Коздоба Л.А., Круковский П.Г.* Методы решения обратных задач теплопереноса. Киев: Наукова думка, 1982. 358 с.
188. *Алифанов О.М.* Идентификация процессов теплообмена летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1979. 216 с.
189. Алгоритмы диагностики тепловых нагрузок летательных аппаратов / Под ред. В.П. Мишина. М.: Машиностроение, 1983. 168 с.
190. *Мацевитый Ю.М., Прокофьев В.Е., Широков В.С.* Решение обратных задач теплопроводности на электрических моделях. Киев: Наукова думка, 1980. 132 с.
191. *Сергеева Л.А., Сергеев В.Л.* Простой метод измерения переменного теплового потока // ИФЖ. 1977. Т. 33, № 1. С. 111–115.
192. *Сурков Г.А., Юревич Ф.Б., Скакун С.Д.* Некоторые исследования в области определения нестационарных тепловых потоков // ИФЖ. 1977. Т. 33, № 6. С. 1078–1084.
193. Температурные измерения: Справочник / О.А. Геращенко, А.Н. Гордов, В.И. Лах и др. Киев: Наукова думка, 1984. 494 с.
194. *Линевег Ф.* Измерение температур в технике: Справочник. М.: Металлургия, 1980. 544 с.
195. *Снопко В.Н.* Спектральные методы оптической пирометрии нагретой поверхности. Минск: Наука и техника, 1988. 152 с.
196. *Поскачей А.А., Чарихов Л.А.* Пирометрия объектов с изменяющейся излучательной способностью. М.: Металлургия, 1978. 200 с.
197. *Абрамович Б.Г.* Термоиндикаторы. М.: Энергия, 1972. 224 с.
198. *Серьезнов А.Н.* Измерения при испытаниях авиационных конструкций на прочность. М.: Машиностроение, 1976. 224 с.
199. *Кулаков М.В., Макаров Б.И.* Измерение температуры поверхности твердых тел. М.: Энергия, 1979. 96 с.
200. *Ярышев Н.А.* Теоретические основы измерения нестационарной температуры. Л.: Энергоатомиздат, 1990.
201. *Преображенский В.П.* Теплотехнические измерения и приборы. М.: Энергия, 1978. 704 с.
202. *Кузнецов Г.В., Мухаммадеев К.М.* Численная оценка погрешности измерения температур в условиях локального неидеального контакта спая термопары и материала // Изв. Томского политехнического университета. 2009. Т. 314. Вып. 4. С. 15–23.
203. Методические погрешности измерения термопарами температуры тонкостенной металлической конструкции / А.Н. Баранов, В.В. Давыдова, Т.А. Попова и др. // Тр. ЦАГИ. 2004. Вып. 2658. 80 с.

204. *Боровкова Т.В.* Методика определения погрешности измерения температуры с помощью термопар в элементах конструкций из неметаллических функционально неразрушаемых материалов: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2008. 178 с.
205. *Бек Б.* Искажающее влияние термопары на температурное поле в материалах с низкой теплопроводностью // Теплопередача. 1961. № 2. С. 33–42.
206. *Елисеев В.Н., Соловов В.А.* Погрешности измерения температур термопарами в полупрозрачных материалах // Гелиотехника. 1983. № 6. С. 45–49.
207. Оценка погрешности измерения поверхностной температуры полупрозрачного материала контактным датчиком / В.Н. Елисеев, В.И. Воротников, В.А. Товстоног, В.А. Соловов // Изв. вузов. Машиностроение. 1981. № 11. С. 77–81.
208. *Боровкова Т.В., Елисеев В.Н., Лопухов И.И.* Исследование искажений температурного поля конструкции, вносимых термопарными датчиками // Математическое моделирование в механике сплошных сред: сб. докладов XXI Междунар. конф. СПб., 2005. Т. 2. С. 113–119.
209. *Боровкова И.В., Елисеев В.Н., Лопухов И.И.* Повышение точности измерения температуры при испытаниях на стенде радиационного нагрева элементов конструкций из низкотеплопроводных материалов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. 2006. № 3. С. 51–63.
210. Identification of Radiative and Conductive Heat Transfer Parameters at Presence of Errors in Initial Data / S.V. Reznik, P.V. Prosuntsov, A.M. Mikhalev, D.Yu. Kalinin // Inverse Problems and Experimental Design in Thermal and Mechanical Engineering: Proc. Eurotherm Seminar 68. Poitiers, 2001. P. 293–300.
211. *Михалев А.М., Резник С.В.* Определение методической погрешности термопарных измерений в частично прозрачных рассеивающих материалах при нестационарном нагреве // Изв. вузов. Машиностроение. 1988. № 2. С. 63–67.
212. *Товстоног А.В.* Выбор программы тепловых испытаний объектов, обладающих спектрально-селективными свойствами на установках лучистого нагрева // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. 1997. № 3. С. 54–61.
213. *Товстоног В.А.* Моделирование теплового режима огнестойких армированных пластиков // ТВТ. 1993. Т. 31, № 5. С. 795–800.

214. Алгоритм расчета радиационно-кондуктивного теплообмена в установках с газоразрядными источниками излучения / Мью Тан, К.П. Баслык, В.А. Товстоног, В.Н. Елисеев // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. 2007. № 4. С. 33–46.
215. *Мью Тан*. Разработка методического и алгоритмического обеспечения тепловых испытаний материалов и элементов конструкций в стендах с газоразрядными источниками излучения: Дис. ... канд. техн. наук. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 181 с.
216. Анализ влияния спектральных характеристик излучения на температурное состояние двухслойной пластины / Мью Тан, Ф.Ф. Мосалов, К.П. Баслык, В.Н. Елисеев // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. 2006. № 3. С. 24–36.
217. Тепловые испытания элементов конструкций летательных аппаратов: Учеб. пособ. / А.В. Астрахов, И.С. Виноградов, Б.Б. Петрикевич и др. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 52 с.
218. Water Absorption Spectrum. URL: <http://www.lsbu.ac.uk/water/vibrat.html>
219. *Градов В.М., Щербаков А.А.* Расчет излучательных характеристик дуговых криптоновых и ксеноновых разрядов // Оптика и спектроскопия. 1979. Т. 47, № 4. С. 635–642.
220. *Градов В.М., Зимин А.М.* Расчет предельных энергий импульсных газоразрядных ламп // Изв. СО АН СССР. Сер. Технические науки. 1981. Вып. 2. С. 134–142.
221. *Градов В.М., Синярев Г.Б.* Теплообмен в сильноизлучающих нестационарных дугах, стабилизированных стенками // Генерация потоков электродуговой плазмы. Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1987. С. 171–183.
222. *Елисеев В.Н.* Расчет температурного поля колбы газоразрядной лампы // Светотехника. 1968. № 9. С. 15–18.
223. *Елисеев В.Н.* К определению режима охлаждения фильтра теплового излучения // Изв. вузов. Машиностроение. 1969. № 6. С. 87–90.
224. *Елисеев В.Н.* К расчету температуры цилиндрической колбы охлаждаемой газоразрядной лампы // Светотехника. 1969. № 3. С. 6.
225. *Зарубин В.С.* О работоспособности оболочки с объемным поглощением проникающего излучения // Тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана. 1974. № 205. С. 105–109.
226. *Варгафтик Н.Б.* Теплофизические свойства веществ: Справочник. М.; Л.: Энергоиздат, 1956. 175 с.
227. *Сергеев О.А., Чадович Г.З.* Теплофизические свойства плавленого кварца // Исследования в области тепловых измерений: Тр. метрологич. ин-та СССР. М.; Л. 1969. Вып. 111(171). С. 151–161.

228. Вугман В.М., Волков В.И. Галогенные лампы накаливания. М.: Энергия, 1980.
229. Смирнов В.И. Физико-химические основы технологии электронных средств: Учеб. пособ. Ульяновск: УлГУ, 2005.
230. Розенберг Г.В. Оптика тонкослойных покрытий. М.: Физматгиз, 1958. 572 с.
231. Кнунянц И.Л. Химическая энциклопедия: В 5 т. М.: Советская энциклопедия, 1992. Т. 2. 1333 с.
232. Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Ч. I. Поглощение лазерного излучения в веществе / Под ред. В.П. Вейко. СПб.: СПб НИУ ИТМО, 2011. 146 с.
233. Брамсон М.А. Инфракрасное излучение нагретых тел. М.: Наука, 1964. 224 с.
234. Излучательные свойства твердых материалов: справочник / Под ред. А.Е. Шейндлина. М.: Энергия, 1974. 404 с.
235. Товстоног В.А., Елисеев В.Н. К расчету оптических характеристик конструкций из полупрозрачных материалов // Изв. вузов. Машиностроение. 1976. № 2. С. 102–107.
236. Свет Д.Я. Объективные методы высокотемпературной пирометрии при непрерывном спектре излучения. М.: Наука, 1968. 240 с.
237. Справочник по композиционным материалам: В 2 кн.; Под ред. Дж. Любина. М.: Машиностроение, 1988. Кн. 1. 448 с.; Кн. 2. 584 с.
238. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб.: Профессия, 2006. 624 с.
239. Третьяченко Г.Н., Грачева Л.И. Термическое деформирование неметаллических деструктурирующих материалов. Киев: Наукова думка, 1983. 246 с.
240. Кодолов В.И. Горючесть и огнестойкость полимерных материалов. М.: Химия, 1976. 176 с.
241. Нейман Н.Б., Голубенкова Л.И., Коварская Б.М. Термическая деструкция эпоксидных смол // Высокомолекулярные соединения. 1959. № 10. С. 1531–1536.
242. Товстоног А.В., Елисеев В.Н. Оценка масштабных факторов при моделировании тепловых режимов огнестойких композиционных материалов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 1998. № 3. С. 78–86.
243. Джалурия Й. Естественная конвекция. М.: Мир, 1983. 400 с.
244. Себеси Т., Брэдишоу П. Конвективный теплообмен. М.: Мир, 1987. 592 с.

245. *Layrendeau N.M.* Thermal ignition of methane-air mixture by hot surfaces: a critical examination // *Combustion and Flame*. 1982. Vol. 46. P. 29–49.
246. *Колтун М.М.* Селективные оптические поверхности преобразователей солнечной энергии. М.: Наука, 1979. 216 с.
247. *Мьо Тан.* О выборе рациональной формы рефлектора для нагревателя с газоразрядными источниками излучения // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. 2008. № 2. С. 117–120.
248. *Krook M.* On solution of equation of transfer // *Astrophis. J.* 1955. Vol. 122, no. 3. P. 488–497.
249. *Горский В.В., Товстоног В.А.* О применении метода моментов к решению уравнения лучистого переноса // *Тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана*. 1976. № 205. С. 70–78.
250. *Елисеев В.Н., Товстоног В.А.* Теоретические основы расчета сложного теплообмена в элементах конструкций. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1982. 52 с.
251. *Товстоног В.А.* Об определении степени черноты полупрозрачных конструкционных материалов // *Изв. вузов. Сер. Машиностроение*. 1978. № 6. С. 61–66.
252. *Товстоног В.А.* Метод расчета теплообмена излучением в многослойных рассеивающих средах // *Тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана*. 1988. № 495. С. 31–42.
253. *Товстоног В.А.* Анализ теплообмена в светорассеивающих материалах, нагреваемых излучением // *ФХОМ*. 1985. № 3. С. 35–40.
254. *Товстоног В.А.* Теплофизика рассеивающих материалов: Прикладные проблемы и решения // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. 2000. № 3. С. 67–85.
255. *Горский В.В., Товстоног В.А.* Исследование оптических свойств стеклопластиков // *Тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана*. 1976. № 205. С. 88–93.
256. *Товстоног В.А.* Об определении терморadiационных характеристик рассеивающих материалов по излучательной способности // *ТВТ*. 1987. Т. XXIV, № 1. С. 170–172.
257. *Товстоног В.А.* Метод комбинаторной статистической идентификации оптических констант светорассеивающих материалов // *Тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана*. 1982. № 392. С. 47–54.
258. *Товстоног В.А.* Идентификация терморadiационных характеристик светорассеивающих материалов // *Изв. СО АН СССР. Сер. Технические науки*. 1987. Вып. 2. С. 16–21.
259. *Горский В.В., Товстоног В.А.* Теплообмен в разрушающемся материале // *Изв. вузов. Сер. Машиностроение*. 1977. № 1. С. 9–14.

260. *Соколов А.В.* Оптические свойства металлов. М.: ГИФМЛ, 1961. 464 с.
261. Физическая оптика. Терминология. Сборники рекомендуемых терминов. Вып. 79. М.: Наука, 1970. 50 с.
262. Теория теплообмена. Терминология. Сборники рекомендуемых терминов. Вып. 83. М.: Наука, 1971. 80 с.
263. *Гриликес В.А., Матвеев В.М., Полуэктов В.П.* Солнечные высокотемпературные источники тепла для космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1975. 247 с.
264. *Акишин А.И., Новиков Л.С.* Воздействие окружающей среды на материалы космических аппаратов. М.: Знание, 1983. 64 с.
265. *Сесс Э.М., Сэрроу Р.Д.* Теплообмен излучением. Л.: Энергия, 1971. 294 с.
266. *Иванов В.П., Батраков А.С.* Трехмерная компьютерная графика / Под ред. Г.М. Полищука. М.: Радио и связь, 1995. 224 с.
267. *Топорец А.С.* Оптика шероховатой поверхности. Л.: Машиностроение, 1988. 192 с.
268. *Torrance K.E., Sparrow E.M.* Theory for off-specular reflectance from roughened surfaces // J. Opt. Soc. Am. 1967. Vol. 57. P. 1105–1114.
269. Большой энциклопедический словарь. Физика. М.: Большая Российская энциклопедия, 1998. 944 с.
270. *Альперин В.И.* Конструкционные стеклопластики. Л.: Химия, 1979. 358 с.
271. *Долгополов В.И.* Светотехнические материалы. М.: Энергия, 1972. 167 с.
272. *Полунин В.Л.* Пенополимеры в низкотемпературной изоляции. М.: Энергоатомиздат, 1991. 192 с.
273. *Харламов А.Г.* Теплопроводность высокотемпературных теплоизоляторов. М.: Атомиздат, 1979. 100 с.
274. *Товстоног В.А.* Исследование характеристик лучистого теплопереноса в композиционном материале // Изв. вузов. Сер. Машиностроение. 1977. № 7. С. 50–54.
275. Пат. № 2015361 РФ, Теплоизолирующее покрытие камеры сгорания ДВС / В.Г. Мерзликин, В.А. Товстоног.
276. *Красс М.С., Мерзликин В.Г.* Радиационная теплофизика снега и льда. Л.: Гидрометеоздат, 1990. 261 с.
277. Методика расчета радиационных и температурных полей снежных и ледяных массивов / М.С. Красс, В.Г. Мерзликин, В.А. Товстоног и др. // Материалы гляциологических исследований. 2000. № 89. С. 1–9.

278. Тимошенко В.П., Тренев М.Г. Метод расчета тепловых режимов многослойных полупрозрачных материалов // Ученые записки ЦАГИ. 1986. Т. 17, № 2. С. 83–93.
279. Рубцов Н.А., Голова Е.П. Влияние рассеяния на нестационарный радиационно-кондуктивный теплообмен в двухслойной системе // Изв. СО АН СССР. Сер. Технические науки. 1986. № 5. С. 64–72.
280. Радиационные свойства газов при высоких температурах // В.А. Каменщиков, Ю.А. Пластинин и др. М.: Машиностроение, 1971. 440 с.
281. Бутковский А.Г. Структурная теория распределенных систем. М.: Наука, 1977. 320 с.
282. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967. 600 с.
283. Справочник по специальным функциям / под. ред. М. Абрамовица, И. Стиган. М.: Наука, 1979. 830 с.
284. Справочник по инфракрасной технике: В 4 т. Т. 2: Проектирование оптических систем / Под ред. У. Вольфа, Г. Цисиса. М.: Мир, 1998. 347 с.
285. Товстоног В.А. Модель высокотемпературных термических превращений политетрафторэтилена // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 1997. № 1. С. 115–126.
286. Розенберг Г.В. Электродинамика статистически неоднородных сред и теория переноса // Теоретические и прикладные проблемы рассеяния света. Минск: Наука и техника, 1971. С. 159–170.
287. Иванов А.П. Оптика рассеивающих сред. Минск: Наука и техника, 1969. 592 с.
288. Иванов А.П., Лойко В.А., Дик В.П. Распространение света в плотноупакованных дисперсных средах. Минск: Наука и техника, 1988. 191 с.
290. Барабаненков Ю.Н., Финкельберг В.М. Метод функций Грина в теории многократного рассеяния волн // Теоретические и прикладные проблемы рассеяния света. Минск: Наука и техника, 1971. С. 171–186.
291. Верещагин В.Г. Рассеяние излучения в средах с высокой объемной концентрацией // Распространение света в дисперсной среде. Минск: Наука и техника, 1982. С. 135–152.
292. Исмару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах: В 2 т. М.: Мир, 1981. Т. 1. 280 с.
293. Барабаненков Ю.Н. Многократное рассеяние волн на ансамбле частиц и теория переноса излучения // УФН. 1975. Т. 117, № 1. С. 49–78.

294. *Барбаненков Ю.Н., Финкельберг В.М.* Уравнение переноса излучения для коррелированных рассеивателей // *ЖЭТФ*. 1967. Т. 53, № 3(9). С. 978–986.
295. *Бард Й.* Нелинейное оценивание параметров. М.: Статистика, 1979. 349 с.
296. *Гуревич М.М.* Введение в фотометрию. Л.: Энергия, 1968. 244 с.
297. *Слободкин Л.С., Сотников-Южик Ю.М.* Методы определения терморadiационных свойств полимерных покрытий. Минск: Наука и техника, 1977. 160 с.
298. *Розенберг Г.В.* Оптические свойства толстых слоев однородной рассеивающей среды // *Спектроскопия светорассеивающих сред*. Минск: Изд-во АН БССР, 1963. С. 5–36.
299. *Розенберг Г.В., Сахновский М.Ю., Гуминецкий С.Г.* О методах абсорбционной спектроскопии плоских образцов слабо поглощающих светорассеивающих веществ // *Оптика и спектроскопия*. 1967. Т. XXIII, № 5. С. 797–806.
300. *Зега Э.П., Значенок М.П., Кацев И.Л.* Определение оптических характеристик рассеивающих слоев по диффузному отражению и пропусканию // *Журн. прикл. спектр.* 1980. Т. XXXIII, № 4. С. 735–741.
301. *Войшвилло Н.А.* Исследование среды со слабым поглощением на основе двухпараметрической теории и теории Розенберга // *Оптика и спектроскопия*. 1971. Т. XXXI, № 3. С. 412–417.
302. *Шиловский А.А.* Прикладная физическая оптика. М.: Физматгиз, 1961. 822 с.
303. *Горшков М.М.* Эллипсометрия. М.: Сов. радио, 1974. 200 с.
304. *Статистические методы обработки эмпирических данных*. М.: Изд-во стандартов, 1978. 232 с.
305. *Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К.* Машинные методы математических вычислений. М.: Мир, 1980. 297 с.
306. *Сегерлинд Л.* Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 392 с.
307. *Маршалл В.* Основные опасности химических производств. М.: Мир, 1989. 678 с.
308. *Фалеев М.И., Герасимов Ю.М.* Руководство по определению зон воздействия опасных факторов аварий со сжиженными газами, горючими жидкостями и аварийно химически опасными веществами на объектах железнодорожного транспорта. М.: Министерство путей сообщения Российской Федерации, 1997. 66 с.
309. *Гришин А.М.* Математические модели лесных пожаров. Томск: Изд-во ТГУ, 1981. 277 с.

310. *Гришин А.М., Грузин А.Д., Грузина Э.Э.* Аэродинамика и теплообмен фронта лесного пожара с приземным слоем атмосферы // ПМТФ. 1984. № 6. С. 91–96.
311. *Гришин А.М., Плюхин В.В.* Экспериментальное исследование структуры фронта верхового лесного пожара // ФГВ. 1985. Т. 21, № 1. С. 21–26.
312. *Гришин А.М., Зверев В.Г., Шевелев С.В.* О стационарном распространении верховых лесных пожаров // ФГВ. 1986. Т. 22, № 6. С. 101–108.
313. *Гришин А.М., Грузин А.Д., Зверев В.Г.* Теплоперенос и распространение горящих частиц в приземном слое атмосферы при верховых лесных пожарах // ФГВ. 1981. Т. 17, № 4. С. 78–84.
314. *Бородай С.П., Бородай Ф.Я.* Использование кварцевой керамики в качестве эталона диффузного отражения // Оптико-механическая промышленность. 1974. № 5. С. 45–47.
315. *Воронкова Е.М., Воронков Е.М., Гречушников Б.Н.* Оптические материалы для инфракрасной техники. М.: Наука, 1965. 335 с.
316. *Орлова О.В., Фомичева Т.Н.* Технология лаков и красок. М.: Химия, 1990. 381 с.
317. *Романенко И.Г., Левитес Ф.А.* Огнезащита строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1991. 320 с.
318. *Страхов В.Л., Крутов А.М., Давыдкин Н.Ф.* Огнезащита строительных конструкций. М.: Изд-во ТИМП, 2000. 435 с.
319. *Исаков Г.Н., Несмелов В.В.* О некоторых закономерностях тепло- и массопереноса во вспучивающихся огнезащитных материалах // ФГВ. 1994. Т. 30, № 2. С. 57–63.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

---

Предисловие .....	3
Введение .....	6
<b>Глава 1. Особенности процессов теплообмена при действии излучения .....</b>	<b>12</b>
1.1. Основные положения теории теплообмена излучением.....	12
1.2. Основные понятия и определения.....	15
1.3. Взаимодействие излучения с веществом .....	21
1.4. Уравнение переноса энергии излучения.....	29
1.4.1. Система уравнений РКТ .....	34
1.4.2. О роли полупрозрачности в задачах внутреннего РКТ .....	36
1.4.3. Проблемы полупрозрачности в задачах РКТ при действии внешних источников излучения .....	40
1.4.4. Задачи моделирования взаимодействия излучения с материалами и при тепловых испытаниях конструкций .....	49
<b>Глава 2. Характеристики источников излучения и нагревательных устройств для тепловых испытаний материалов и конструкций .....</b>	<b>52</b>
2.1. Трубчатые источники излучения и особенности их использования в практике тепловых испытаний.....	52
2.2. Общие характеристики трубчатых источников излучения и излучательных систем.....	55
2.3. Характеристики галогенных ламп накаливания .....	57
2.4. Характеристики газоразрядных источников излучения .....	64
2.5. Характеристики излучающих систем .....	72
2.5.1. Схемы компоновки излучающих систем.....	72
2.5.2. Плоский блок ГЛН.....	72
2.5.3. Плоский блок ГИИ .....	74
2.5.4. Излучательная система с единичным ГИИ .....	77

---

<b>Глава 3. Стенды и установки радиационного нагрева</b> .....	79
3.1. Теплофизические стенды .....	79
3.2. Установки радиационного нагрева на основе галогенных ламп накаливания .....	82
3.2.1. Установка для тепловых испытаний осесимметричных объектов при комбинированном воздействии .....	82
3.2.2. Установка для испытания плоских объектов и фрагментов конструкций .....	82
3.3. Установки на основе газоразрядных источников излучения .....	90
3.3.1. Компоновочные схемы ГИИ .....	90
3.3.2. Одно- и многоламповые установки .....	92
3.3.3. Мобильные установки с ГИИ .....	99
3.3.4. Установки импульсного и частотного режимов нагрева .....	104
3.3.5. Применение ИИ для исследований термостойкости материалов при высоких скоростях нагрева .....	108
3.3.6. Перспективы применения ИИ при испытаниях аэрокосмических конструкций .....	117
<b>Глава 4. Методические вопросы обеспечения измерений     параметров тепловых испытаний</b> .....	125
4.1. Калориметрия потоков излучения .....	125
4.2. Датчики для измерения потоков излучения .....	127
4.2.1. Экспоненциальный датчик .....	127
4.2.2. Асимптотический датчик теплового потока .....	128
4.2.3. Водоохлаждаемый радиометр .....	131
4.2.4. Датчики теплового потока, основанные на методах решения ОЗТ .....	133
4.3. Термометрия объектов испытаний .....	138
4.3.1. Методическая погрешность и причины ее возникновения .....	138
4.3.2. Постановка задачи определения методической погрешности измерения температуры .....	142
4.3.3. Погрешность измерения температуры при установке термопары в паз .....	148
4.3.4. Погрешность измерения температуры при установке термопары с помощью пробок .....	157

---

<b>Глава 5. Теплообмен при тепловых испытаниях конструкций с использованием трубчатых источников излучения</b> .....	161
5.1. Радиационный теплообмен в замкнутой системе поверхностей с газоразрядными источниками излучения .....	161
5.2. Радиационно-кондуктивный теплообмен в рабочем участке с газоразрядными источниками излучения .....	168
5.3. Физическая модель водоохлаждаемого газоразрядного источника излучения .....	178
5.4. Тепловой режим водоохлаждаемых оболочек газоразрядного источника излучения .....	189
5.5. Тепловой режим оболочки галогенной лампы накаливания .....	194
5.6. Особенности теплообмена в галогенной лампе накаливания и составляющие интегрального потока ее излучения .....	197
5.7. Радиационно-кондуктивный теплообмен в рабочем участке с галогенными лампами накаливания .....	204
<b>Глава 6. Моделирование теплового режима объекта испытаний</b> .....	212
6.1. Выбор размеров образца при моделировании тепловых режимов огнестойких композиционных материалов .....	212
6.2. Выбор ориентации образца .....	218
6.3. Роль спектра источника излучения в моделировании температурного поля образца .....	223
6.4. Выравнивание температурного поля на поверхности объекта испытания .....	227
6.5. Выбор формы рефлектора .....	232
<b>Глава 7. Теплообмен излучением в полупрозрачных средах</b> .....	239
7.1. Решение уравнения переноса излучения методом моментов .....	239
7.1.1. Основные соотношения метода моментов .....	239
7.1.2. Граничные условия для системы моментных уравнений .....	242
7.1.3. Интегральные оптические характеристики граничных поверхностей .....	244
7.1.4. Аналитические решения системы моментных уравнений .....	254

---

7.2. Расчет фотометрических и излучательных характеристик плоского слоя рассеивающей среды .....	259
7.2.1. Расчет коэффициентов отражения и пропускания плоского слоя рассеивающей среды .....	259
7.2.2. Расчет излучательной способности плоского слоя рассеивающей среды .....	265
7.3. Метод расчета теплообмена в многослойной рассеивающей среде .....	268
7.4. Приближение лучистой теплопроводности .....	277
7.5. Теплообмен излучением в поглощающей и излучающей среде .....	278
7.6. Излучательная способность защитных покрытий .....	282
<b>Глава 8. Прикладные задачи радиационного и радиационно-кондуктивного теплообмена .....</b>	<b>286</b>
8.1. Нестационарный нагрев полупрозрачного теплозащитного покрытия .....	286
8.2. Оценка влияния качественных характеристик потока излучения на температурное состояние объемно отражающего покрытия .....	291
8.3. Методы определения оптических свойств полупрозрачных рассеивающих материалов .....	300
8.3.1. Основные допущения и постановка задачи идентификации оптических свойств рассеивающих материалов .....	300
8.3.2. Определение оптических свойств рассеивающей среды по результатам парных измерений .....	304
8.3.3. Определение оптических свойств рассеивающих материалов по произвольному набору данных .....	310
8.3.4. Учет угловой структуры зондирующего излучения .....	321
8.3.5. Технические средства и методика определения оптических характеристик рассеивающих материалов при использовании направленного источника излучения ...	324
8.4. Особенности теплообмена излучением в рассеивающей среде .....	328
8.5. Радиационно-кондуктивный теплообмен в многослойной полупрозрачной рассеивающей среде .....	332

---

8.6. Моделирование характеристик огнезащитных материалов .....	340
8.6.1. Излучение пожаров и основные соотношения для моделирования характеристик огнезащитных материалов .....	340
8.6.2. Оптическая модель вещества .....	347
8.6.3. Оценка огнетеплозащитных характеристик композиционных рассеивающих материалов на неорганической основе .....	348
8.6.4. Сравнительная оценка характеристик огнетеплозащитных композиционных рассеивающих материалов .....	351
8.6.5. Оптические характеристики дисперсно-наполненных материалов .....	358
8.7. Комбинированная система огнетеплозащиты .....	361
Литература .....	370

V.N. Eliseev, V.A. Tovstonog

**HEAT TRANSFER AND HEAT  
TESTING OF MATERIALS  
AND AEROSPACE STRUCTURES  
WITH RADIANT HEATING**

BMSTU Publishing

Moscow 2014

UDC 536.2:629.78:621.18.062

BBC 31.31

E51

*Reviewers:*

Head of the “Space and Rocket Systems” Department, Moscow Aviation Institute, RAS Corresponding Member *O.M. Alifanov*;

Deputy Director Institute for Problems in Mechanics of RAS, RAS Corresponding Member *S.T. Surzhikov*

**Eliseev V.N.**

E51 Teploobmen i teplovye ispytaniia materialov i konstruktssii aerokosmicheskoi tekhniki pri radiatsionnom nagreve [Heat transfer and heat testing of materials and aerospace structures with radiant heating]. V. N. Eliseev, V. A. Tovstonog, Moscow, BMSTU Publ., 2014, 396 p., il.

ISBN 978-5-7038-3947-8

The monograph is devoted to the problems of heat transfer and thermal testing of materials and aerospace structures using high-intensity radiation sources. The research explored the characteristics of the most promising tubular radiation sources and demonstrated examples of their practical use.

The work examined radiation and radiation-conductive heat transfer in translucent scattering medium that includes all features of the heat transfer processes in materials for aircraft designs, as well as problems of heat transfer in thermal testing and modeling the thermal regime of the test objects. The findings of the research illustrate the solutions of topical applications of radiation and radiation-conduction heat transfer. The study addressed the most important methodological issues of measuring the heat flows and temperatures.

The work is of great help to scientists and engineers, specializing in the field of thermal testing and thermal studies in the rocket and space technology. It can be of interest to students majoring in aviation and missile design.

### **About authors:**

**Viktor Nikolaevich Eliseev**, Dr. Sci. (Eng.), Professor at the Department of Spacecraft and Launch Vehicles of Bauman Moscow State Technical University (BMSTU). His research includes the studies of thermal testing of materials and aerospace structures and simulation of their thermal regimes under high-intensity radiation.

**Valeriy Alekseevich Tovstonog**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, senior researcher at the Department of Spacecraft and Launch Vehicles of Bauman Moscow State Technical University (BMSTU). His interests include numerous areas of heat transfer research. Among them are methods of calculation and experimental studies of radiative and combined heat transfer in translucent materials, methodology of thermal and strength testing of aerospace materials and constructions, and thermal destruction of heat- and fire-protective materials.

*This book examines a number of aspects concerning heat exchange and thermal testing of materials and aerospace structures using high-intensity radiation sources. The authors mainly focus on developing methods for heating the samples and large structural elements up to 2000-2500 K. The research also explored special features of heat exchange in partially transparent materials heated by radiation.*

*This work presents the results of research conducted at the Department of Spacecraft and Launch Vehicles of Bauman Moscow State Technical University (BMSTU). The team was led by Professor G.B. Sinyarev, the founder of a thermophysical research school, Doctor of Science, Honoured Science Worker and Technologist of the USSR.*

*Научное издание*

**Елисеев** Виктор Николаевич  
**Товстоног** Валерий Алексеевич

**ТЕПЛООБМЕН И ТЕПЛОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ  
И КОНСТРУКЦИЙ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ  
ПРИ РАДИАЦИОННОМ НАГРЕВЕ**

Редактор *Е.Н. Ставицкая*  
Технический редактор *Э.А. Кулакова*  
Художник *А.К. Ездовой*  
Корректор *Р.В. Царева*  
Компьютерная графика *О.С. Левашева*  
Компьютерная верстка *В.И. Товстоног*

Оригинал-макет подготовлен  
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Сертификат соответствия № РОСС RU.АЕ.51 Н 16228 от 16.06.2012

Подписано в печать 25.06.2014. Формат 60×90 1/16.  
Усл. печ. л. 25,0. Тираж 400 экз. Заказ №

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
[www.baumanpress.ru](http://www.baumanpress.ru)

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
[baumanprint@gmail.com](mailto:baumanprint@gmail.com)