

Издание осуществлено при поддержке открытого акционерного общества «Военно-промышленная корпорация «Научно-производственное объединение машиностроения»



УДК 621.1.016+536.2

ББК 31.31

Г67

Горский В. В.

Теоретические основы расчета абляционной тепловой защиты.

– М.: Научный мир, 2015. – 688 с.: 256 библ. назв., 56 табл., 127 рис.

ISBN 978-5-91522-417-8

Монография посвящена рассмотрению широкого круга вопросов, связанных с построением расчетно-теоретических моделей уноса массы теплозащитных материалов различных классов, и является результатом многолетних исследований, выполненных автором при проектировании различных высокоэнергетических устройств. Большое внимание в книге уделяется численным методам решения возникающих при этом сложных физико-математических задач, сопряженному исследованию обтекания, нагрева, прогрева и обгара тепловой защиты, определению физических свойств тепловой защиты на базе расчетно-теоретического анализа результатов абляционных экспериментов, комплексному анализу экспериментальных данных и инженерным методам расчета конвективного теплообмена. Материалы, помещенные в книгу, в течение многих лет использовались в учебной работе со студентами МГТУ им. Н. Э. Баумана и в научной работе со студентами МФТИ.

Книга может быть полезна студентам старших курсов, аспирантам и научным работникам, связанным с решением различных задач в области конвективного теплообмена и тепловой защиты высокоэнергетических устройств.

Рецензенты:

д.т.н., профессор П.В. Никитин (МАИ),

д.ф.-м.н., профессор Ю.И. Димитриенко (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	11
ВВЕДЕНИЕ	13
Глава 1. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ О ДВУМЕРНОМ СТАЦИОНАРНОМ ОСЕСИММЕТРИЧНОМ ТЕЧЕНИИ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ДИССОЦИИРОВАННОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ В ЛАМИНАРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ.....	23
Введение	23
§ 1.1. Система уравнений, описывающих двумерное стационарное осесимметричное течение многокомпонентной газовой смеси в тонком ламинарном пограничном слое на гладкой стенке	24
§ 1.2. Методика расчета переносных свойств многокомпонентной газовой смеси	43
§ 1.3. Методика использования параметров течения идеального газа при решении уравнений пограничного слоя	55
§ 1.4. Автомодельные уравнения ламинарного пограничного слоя.....	61
§ 1.5. Универсальный подход к выбору коэффициента бинарной диффузии в газовых смесях сложного химического состава	63
§ 1.6. О развитии пограничного слоя в неравномерном внешнем потоке.....	68
§ 1.7. Усиление теплообмена за счет шероховатости стенки.....	75
§ 1.8. Алгоритм численного решения задач теплопереноса и трения.....	76
Выводы по главе 1.....	79
Литература.....	80

Глава 2. ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС И ТРЕНИЕ В ВОЗДУШНОМ ЛАМИНАРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУСФЕРЫ.....	84
Введение	84
§ 2.1. К вопросу о формировании граничных условий на внешней границе пограничного слоя в окрестности критической точки сферы.....	86
Вывод по параграфу	92
§ 2.2. Тепломассоперенос и трение в тонком пограничном слое на непроницаемой стенке в окрестности критической точки сферы.....	92
Выводы по параграфу	101
§ 2.3. Учет эффекта завихренности течения идеального газа в пограничном слое на непроницаемой стенке в окрестности критической точки сферы	102
Выводы по параграфу	106
§ 2.4. Теплообмен и трение в воздушном пограничном слое на проницаемой стенке в окрестности критической точки сферы.....	107
Выводы по параграфу	119
§ 2.5. Теплообмен и трение в тонком пограничном слое на непроницаемой поверхности полусферы, обтекаемой потокм воздуха, находящимся в состоянии термохимического равновесия	120
Выводы по параграфу	133
§ 2.6. Учет эффекта завихренности течения идеального газа в пограничном слое на непроницаемой поверхности полусферы.....	133
Вывод по параграфу	138
§ 2.7. Теплообмен в воздушном пограничном слое на проницаемой поверхности полусферы	138
Выводы по параграфу	142
Литература.....	142
 Глава 3. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ О ДВУМЕРНОМ СТАЦИОНАРНОМ ОСЕСИММЕТРИЧНОМ ТЕЧЕНИИ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ДИССОЦИИРОВАННОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ В ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ	 146
Введение	146
§ 3.1. Система уравнений, описывающих двумерное стационарное осесимметричное течение многокомпонентной газовой смеси	

в тонком ламинарно-турбулентном пограничном слое на гладкой стенке	154
§ 3.2. Переход от ламинарного режима течения газа в пограничном слое к турбулентному	162
§ 3.3. О развитии пограничного слоя в неравномерном внешнем потоке	167
§ 3.4. Усиление теплообмена за счет шероховатости стенки	170
Вывод по главе 3	175
Литература	175

Глава 4. ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС И ТРЕНИЕ В ВОЗДУШНОМ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУСФЕРЫ

Введение	178
§ 4.1. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных по ламинарно-турбулентному теплообмену на поверхности полусферы, омываемой сверхзвуковым потоком воздуха	181
Выводы по параграфу	190
§ 4.2. Тепломассоперенос на непроницаемой стенке в тонком турбулентном пограничном слое	190
Выводы по параграфу	201
§ 4.3. Тепломассоперенос на проницаемой стенке в тонком турбулентном пограничном слое	202
Выводы по параграфу	205
§ 4.4. К вопросу о расчете расхода газа, протекающего через тонкий турбулентный пограничный слой на непроницаемой стенке	206
Выводы по параграфу	210
Литература	211

Глава 5. МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОГО ДВУМЕРНОГО ВЗАИМНО СОПРЯЖЕННОГО РАСЧЕТА ОБТЕКАНИЯ, НАГРЕВА, ПРОГРЕВА И УНОСА МАССЫ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ

Введение	214
§ 5.1. Методология построения крупных программных комплексов	218
§ 5.2. Комплексная методика расчета конвективного теплообмена и изменения формы тела за счет его обгара	222
§ 5.3. Методика решения двумерного уравнения Фурье с подвижной внешней границей в цилиндрической системе координат	233
§ 5.4. Методика комплексного сопряженного расчета линии движения летательного аппарата в атмосфере Земли и потери массы его тепловой защиты	258

§ 5.5. Методика комплексного взаимно сопряженного расчета нагрева и обгара тепловой защиты затупленных тел вращения в струях продуктов сгорания жидкостных ракетных двигателей..	272
Выводы по главе 5.....	283
Литература.....	284
Глава 6. МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОГО ПРОЕКТНОГО РАСЧЕТА ОБТЕКАНИЯ, НАГРЕВА, ПРОГРЕВА И УНОСА МАССЫ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА	288
Введение	288
§ 6.1. Методика вычисления эффективного угла атаки газовым потокм поверхности летательного аппарата	290
§ 6.2. Методика решения одномерного нестационарного уравнения сохранения энергии в конструкционном пакете, содержащем в своем составе газовые слои	294
§ 6.3. Методика вычисления свойств материалов и газовых сред	338
§ 6.4. Методика расчета конвективного теплообмена на телах канонической формы	341
§ 6.5. Методика газодинамического расчета на телах, близких по форме к осесимметричным.....	366
Выводы по параграфу	381
§ 6.6. Методика расчета конвективного теплообмена на телах, близких по форме к осесимметричным телам.....	381
Выводы по главе 6.....	393
Литература.....	393
Глава 7. ПОЛНАЯ ТЕРМОХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УНОСА МАССЫ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ОКИСЛИТЕЛЬНЫХ ГАЗОВЫХ ПОТОКАХ	397
Введение	397
§ 7.1. Физико-математическая постановка задачи	401
§ 7.2. Основные закономерности окисления углерода при отсутствии его сублимации	407
§ 7.3. Основные закономерности окисления углерода при наличии его сублимации	415
Выводы по §§ 7.1–7.3	423
§ 7.4. Исследование квазистационарного термохимического разрушения углеродного материала в высокотемпературном воздушном потоке в окрестности критической точки сферы.....	424
Выводы по параграфу	431

§ 7.5. О неоднозначности в зависимости параметров уноса массы углеродного материала от числа Маха в набегающем воздушном потоке.....	431
Выводы по параграфу	436
Литература.....	436
Глава 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ ОКИСЛЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА БАЗЕ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ АБЛЯЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.....	438
Введение	438
§ 8.1. Методические основы проведения абляционного эксперимента в струях аэродинамических установок для углеродных материалов.....	441
§ 8.2. Определение кинетических констант окисления МУКМ на базе анализа результатов абляционных экспериментов в струе стенда ТТ-1.....	453
Выводы по главе 8.....	458
Литература.....	459
Глава 9. ИССЛЕДОВАНИЕ АБЛЯЦИОННЫХ СВОЙСТВ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА БАЗЕ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В СТРУЕ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ	462
Введение	462
§ 9.1. Методические основы проведения абляционного эксперимента тепловой защиты в струях продуктов сгорания ЖРД.....	465
§ 9.2. К вопросу о роли различных факторов в формировании обгарной формы модели, изготовленной из современного МУКМ, в струе продуктов сгорания кислородно-водородного ЖРД.....	474
§ 9.3. Определение абляционных свойств углеродного материала на базе расчетно-теоретического анализа экспериментальных данных, полученных в струе продуктов сгорания кислородно-водородного ЖРД.....	486
Выводы по главе 9.....	491
Литература.....	492

Глава 10. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО АЭРОТЕРМОХИМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ	494
Введение	494
§ 10.1. Объект исследований. Термическая деструкция связки	496
§ 10.2. Гетерогенное химическое взаимодействие между диоксидом кремния и углеродом во внутренних слоях материала	505
§ 10.3. Оплавление диоксида кремния.....	509
§ 10.4. Механический унос массы углерода и газообразных продуктов разрушения материала	515
§ 10.5. Уравнение сохранения количества энергии	518
§ 10.6. Сублимация конденсированных компонент материала на стенке	522
§ 10.7. Гетерогенные химические реакции, протекающие на стенке	523
§ 10.8. Унос массы диоксида кремния на стенке	524
§ 10.9. Унос массы конденсированного углерода на стенке	526
§ 10.10. Корреляционная связь между изолированными скоростями разрушения конденсированных компонент материала.....	529
§ 10.11. Система граничных условий на стенке.....	530
§ 10.12. Система граничных условий на фронте первичного пиролиза связки.....	534
Выводы по главе 10.....	535
Литература.....	535

Глава 11. ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС НА ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛОГРАФИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ГАЗОВОМ ПОТОКЕ.....	539
Введение	539
§ 11.1. Термодинамический анализ химического состава газовой смеси на стенке	541
§ 11.2. Химический состав газовой смеси на стенке.....	554
§ 11.3. Критические значения скорости аэротермохимического разрушения материала.....	557
§ 11.4. Основные закономерности механизма аэротермохимического разрушения стеклографитовых материалов	560
§ 11.5. Тепловой эффект физико-химических превращений, протекающих на стенке.....	564
§ 11.6. Анализ традиционных численных методов решения задач тепломассопереноса в реагирующих средах.....	570

§ 11.7. Нетрадиционный численный метод решения задач теплопереноса в реагирующих средах.....	572
§ 11.8. Численный метод решения задачи неавтомодельного квазистационарного аэротермохимического разрушения стеклопластика в набегающем на него газовом потоке сложного химического состава.....	579
Выводы по главе 11.....	593
Литература.....	593

Глава 12. ПРИМЕРЫ УСТАНОВЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАНИЗМА АЭРОТЕРМОХИМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ	596
Введение	596
§ 12.1. Теоретическая модель процесса уноса массы стеклопластика ...	597
§ 12.2. Анализ результатов наземной обработки стеклопластиков на фенольной связке	603
§ 12.3. Анализ результатов наземной обработки стеклопластиков на эпоксидной связке.....	611
§ 12.4. Анализ результатов обработки стеклопластиков на фенольной связке при экспериментальном моделировании натуральных условий.....	616
§ 12.5. Анализ результатов обработки стеклопластиков на эпоксидной связке при экспериментальном моделировании натуральных условий.....	620
Выводы по главе 12.....	624
Литература.....	625

Глава 13. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ В ПРОЦЕССЕ ИХ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ	626
Введение	626
§ 13.1. Анализ основных закономерностей процесса термического разрушения стеклопластиков в процессе их лазерной резки	627
Выводы по параграфу	634
§ 13.2. Расчетно-теоретическое исследование влияния скорости лазерной резки стеклопластика на термическое состояние материала.....	636
Выводы по параграфу	642
§ 13.3. К вопросу об определении степени блокировки радиационного теплового потока парами материала при лазерной резке стеклопластика	642

Выводы по главе 13.....	648
Литература.....	648
Глава 14. О НЕОДНОЗНАЧНОСТИ В МЕХАНИЗМЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	650
Введение	650
§ 14.1. Физико-математическая постановка задачи.....	651
§ 14.2. Нестационарный прогрев и термохимическое разрушение термопластичных теплозащитных материалов.....	658
Вывод по главе 14	660
Литература.....	661
Глава 15. РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АЭРОТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ДЕСТРУКЦИИ КАРБИДОКРЕМНИЕВОЙ ПЛЕНКИ, НАНЕСЕННОЙ НА ПОВЕРХНОСТЬ УГЛЕРОД-КЕРАМОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА, ОМЫВАЕМОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ ПОТОКОМ ВОЗДУХА	662
Введение	662
§ 15.1. Физико-математическая постановка задачи.....	663
§ 15.2. Анализ экспериментальных данных по скорости уноса массы карбида кремния.....	679
Выводы по главе 15.....	685
Литература.....	686