



В.Г. ДЕГТЯРЬ

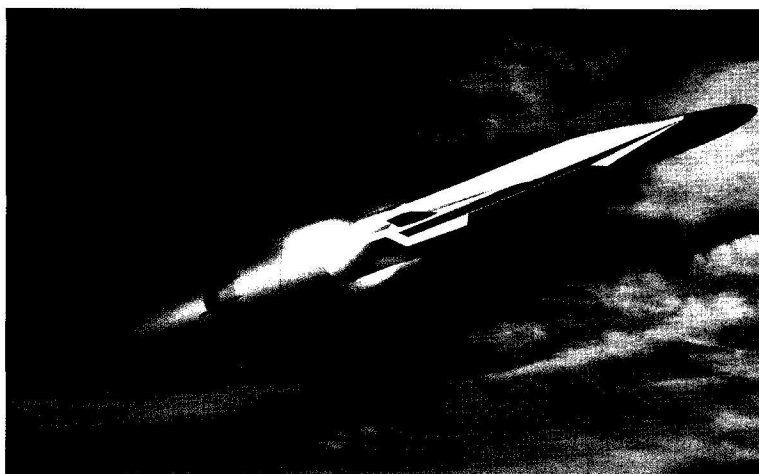
Э.Е. СОН

ГИПЕРЗВУКОВЫЕ
ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ
АППАРАТЫ

В.Г. Дегтярь, Э.Е. Сон

Гиперзвуковые летательные аппараты

Том 1



«Янус-К»
Москва 2018

УДК 533.6
ББК 22.365
Д 26

Рецензенты

Микрин Евгений Анатольевич – академик РАН, д.т.н., профессор,
генеральный конструктор ОАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва»

Погосян Михаил Асланович – академик РАН, д.т.п., профессор,
ректор Московского авиационного института (МАИ)

Алифанов Олег Михайлович – член-корреспондент РАН, д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой «Космические системы и ракетостроение» (МАИ)

Дегтярь В.Г., Сон Э.Е. *Гиперзвуковые летательные аппараты.*: В 2 томах.
(Государственный ракетный центр имени академика В.П. Макеева, Московский физико-технический институт (государственный университет), Объединенный институт высоких температур РАН) М.: Янус-К, 2018. Том 1. 984 с.: ил.

ISBN 978-5-8037-0690-8

Цель настоящей книги – изложить состояние дел в области гиперзвуковых летательных аппаратов, описать экспериментальные исследования, пути и методы достижения результатов, международные проекты в этой области, а также привлечь внимание к этому важному фундаментальному и прикладному направлению.

В монографии, состоящей из двух томов, изложены обзор развития гиперзвуковых летательных аппаратов, разработанных в различных странах ранее или находящихся в разработке в настоящее время, научные основы гиперзвуковых технологий, фундаментальные основы гиперзвуковых течений газа и плазмы, теплофизические свойства вещества при высоких температурах и давлениях, экспериментальные и расчетно-теоретические методы описания процессов, сопровождающих полёт гиперзвуковых летательных аппаратов в нижней и верхней атмосфере, вопросы аэродинамики, теплозащиты, ламинарно-турбулентного перехода и устойчивости течений во внешней и внутренней аэродинамике, современный взгляд на проблемы турбулентности в высокотемпературных средах, влияние плазмы на работоспособность системы управления гиперзвуковых летательных аппаратов, а также некоторые проекты, выполненные в этой области как в отдельных странах, так и в рамках международных проектов. Монография содержит описание гиперзвуковых проектов, которые были реализованы или находятся в стадии разработки в различных странах, к ним относятся проекты США RAM C II, FIRE II, европейские проекты совместно с Россией, такие как HEXAFLY, EXPERT и другие. Обзорная часть содержит наиболее интересные, с точки зрения авторов, результаты, представленные на конференциях по гиперзвуковой тематике за последние годы, а также полученные в совместных исследованиях российских и зарубежных коллективов.

© В.Г. Дегтярь, Э.Е. Сон, 2018

ISBN 978-5-8037-0690-8

Оглавление

| | |
|---|-----------|
| Предисловие | 13 |
| Список сокращений | 17 |
| Часть I История развития гиперзвуковых летательных аппаратов | 23 |
| Глава 1 Исследования гиперзвуковых летательных аппаратов | 31 |
| 1.1 Летательные аппараты с прямоточным воздушно-реактивным двигателем | 32 |
| 1.1.1 Первые работы по прямоточным воздушно-реактивным двигателям для крылатых ракет | 33 |
| Глава 2 Работы по ГЛА в Советском Союзе | 39 |
| 2.1 Крылатая ракета «Буря» | 39 |
| 2.1.1 О роли НИИ-1 и М.В. Келдыша в развитии ГЛА | 39 |
| 2.2 Крылатая ракета «Буран» | 48 |
| 2.2.1 Сравнительные характеристики американских и советских межконтинентальных крылатых ракет | 51 |
| 2.3 Крылатая ракета «Метеорит» | 51 |
| 2.3.1 Плазменные СТЕЛС-технологии | 54 |
| 2.4 Орбитальные планирующие летательные аппараты БОР-1 БОР-6 | 61 |
| 2.4.1 Орбитальные ракетопланы БОР-1–БОР-3 | 61 |
| 2.4.2 Орбитальный ракетоплан БОР-4 | 62 |
| 2.4.3 Беспилотный орбитальный ракетоплан БОР-5 | 71 |
| 2.4.4 Беспилотный орбитальный ракетоплан БОР-6 | 75 |
| 2.5 Авиационно-космическая система «Спираль» | 75 |
| 2.5.1 Орбитальный самолёт | 77 |
| 2.6 Последующие работы по гиперзвуковым прямоточным воздушно-реактивным двигателям и ГЛА в России | 78 |
| 2.7 Разработки в Государственном ракетном центре имени академика В.П. Макеева – носители ГЛА | 85 |

| | | |
|----------------|---|------------|
| 2.7.1 | Международные космические программы АО «ГРЦ Макеева» | 87 |
| 2.7.2 | Морские баллистические ракеты СССР | 88 |
| 2.7.3 | Морские баллистические ракеты России | 91 |
| Глава 3 | Программы ГЛА в США | 95 |
| 3.1 | История исследований ГЛА в США | 96 |
| 3.2 | Программа X-33 | 99 |
| 3.3 | Программа Нурег-X (X-43A) | 99 |
| 3.4 | Программа ARRMD | 101 |
| 3.5 | Программа Нурег-X (X-51A) | 104 |
| 3.5.1 | Задачи программы Нурег-X (X-51A) | 104 |
| 3.5.2 | Конструкция планёра X-51A Waverider | 107 |
| 3.5.3 | Силовая установка (ГПВРД) X-51A | 109 |
| 3.5.4 | Материалы конструкции X-51A | 117 |
| 3.5.5 | Лётные испытания X-51A | 118 |
| 3.5.6 | Результаты четырёх полётов X-51A и планы работ | 121 |
| 3.6 | Совместные программы США и Австралии | 122 |
| 3.6.1 | Программа FALCON | 122 |
| 3.6.2 | Программа HIFIRE | 124 |
| Глава 4 | Программы Европейского сообщества | 128 |
| 4.1 | Программа Prometheus (Франция) | 128 |
| 4.2 | Программа LEA | 129 |
| 4.3 | Программа JARHAR (Франция) | 130 |
| 4.4 | Программа WRR | 130 |
| 4.5 | Проект IXV | 131 |
| 4.5.1 | Задачи проекта IXV | 131 |
| 4.5.2 | История проекта IXV | 132 |
| 4.5.3 | Экспериментальные исследования на борту IXV | 136 |
| 4.5.4 | Результаты лётных испытаний теплозащиты IXV | 139 |
| 4.5.5 | Программа полёта IXV | 140 |
| 4.5.6 | Материалы конструкции IXV | 141 |
| 4.5.7 | Бортовая система измерений IXV | 142 |
| 4.5.8 | Миссия полётов IXV | 145 |
| 4.6 | Прототип европейского многоразового космолана PRIDE (Европа) | 145 |
| 4.7 | Проект LARCAT гиперзвукового транспортного самолёта для межконтинентальных полётов | 146 |
| 4.7.1 | Наземные экспериментальные исследования ГЛА проекта LARCAT | 152 |

| | |
|---|-----|
| Глава 5 Программы исследований ГЛА в Китае | 165 |
| 5.1 Гиперзвуковые исследования в Китае | 165 |
| 5.1.1 Научные исследования глайдеров в Китае | 165 |
| 5.1.2 Экспериментальные исследования | 167 |
| 5.2 Планирующий манёвренный высокоскоростной ГЛА Wu-14 (проект DF-ZF) | 172 |
| 5.2.1 Статистика полётов ГЛА Wu-14 | 173 |
| 5.2.2 Аэродинамическая компоновка Wu-14/DF-ZF | 177 |
| Глава 6 Программы исследований ГЛА в Индии | 178 |
| 6.1 Программа «Демонстратор гиперзвуковых технологий» | 178 |
| 6.1.1 Гиперзвуковые полёты и наземные испытания в Индии | 179 |
| 6.1.2 Многоразовая ракета-посетель | 181 |
| 6.1.3 Эксперимент по входу в плотные слои атмосферы | 181 |
| 6.1.4 Экспериментальная база для ГЛА | 182 |
| 6.2 Возможности наземных испытаний гиперзвука | 183 |
| 6.2.1 Лаборатория DRDL | 184 |
| 6.2.2 Индийский институт технологий в Мадрасе | 184 |
| 6.2.3 Космический центр имени Викрама Сарабхай | 184 |
| 6.3 Гиперзвуковой самолёт | 188 |
| 6.4 Проект «БраМос-II» | 191 |
| Глава 7 Программы исследований ГЛА в Японии | 193 |
| 7.1 Дорожная карта JAXA развития гиперзвукового транспорта | 194 |
| 7.1.1 Направления исследований ГЛА в Японии | 196 |
| 7.1.2 Конструкции и применения гиперзвуковых самолётов | 197 |
| 7.1.3 Технологические проблемы | 200 |
| 7.1.4 План научных исследований | 204 |
| 7.2 Сотрудничество Европы и Японии в гиперзвуковой области | 206 |
| 7.2.1 Проект Hicat1 | 206 |
| Список литературы к первой части | 207 |
| Часть II Фундаментальные физические проблемы гиперзвуковых летательных аппаратов | 211 |
| Глава 8 Термодинамические свойства высокотемпературных сред | 213 |
| 8.1 Термодинамика газов и плазмы | 213 |
| 8.1.1 Термодинамические потенциалы | 214 |
| 8.1.2 Статистическая сумма | 220 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 8.1.3 | Вириальное разложение для неидеального газа | 225 |
| 8.1.4 | Термодинамика слабонеидеальной плазмы | 233 |
| 8.1.5 | Химическое равновесие | 239 |
| 8.1.6 | Система термодинамических уравнений | 248 |
| 8.2 | Термодинамическая база данных ИВТАНТЕРМО | 251 |
| 8.3 | Термодинамический расчёт теплозащитного покрытия в условиях аблирующей поверхности | 256 |
| 8.3.1 | Термодинамическое равновесие | 256 |
| 8.3.2 | Метод вычислений | 257 |
| 8.3.3 | Алгоритм вычислений | 261 |
| 8.3.4 | Выбор начального приближения | 262 |
| 8.3.5 | Критерии достижения заданной точности | 263 |
| 8.3.6 | Вырождение системы линейных уравнений | 264 |
| 8.3.7 | Проблемы сходимости | 265 |
| 8.3.8 | Расчёт равновесного состава для случая, когда давление или температура неизвестны | 265 |
| 8.3.9 | Визуальное представление результатов вычислений | 266 |
| 8.3.10 | Достоверность результатов моделирования | 268 |
| 8.3.11 | Расчёт давлений насыщенных паров | 269 |
| 8.4 | Термодинамические свойства высокотемпературного азота | 273 |

| | | |
|----------------|--|------------|
| Глава 9 | Транспортные свойства | |
| | высокотемпературных сред | 277 |
| 9.1 | Явления переноса в реагирующих газовых смесях | 277 |
| 9.1.1 | Выражения для потоков тепла, массы, импульса и заряда | 281 |
| 9.2 | Эффективные коэффициенты переноса плазмы | 284 |
| 9.3 | Методика расчётов и результаты | 293 |
| 9.4 | Сечения элементарных процессов и интегралы столкновений | 296 |
| 9.4.1 | Потенциалы взаимодействия молекул и атомов высокотемпературного воздуха | 297 |
| 9.4.2 | Примеры расчётов транспортных свойств низкотемпературной плазмы | 307 |
| 9.5 | Пакет программ SoVA для расчёта теплофизических свойств низкотемпературной плазмы | 308 |
| 9.5.1 | Краткая характеристика пакета | 308 |
| 9.5.2 | Расчёт химического состава и термодинамических параметров | 313 |
| 9.5.3 | Расчёт коэффициентов переноса в высших приближениях метода Чепмена-Энскога | 320 |
| 9.5.4 | Вычисление интегралов столкновений | 334 |
| 9.5.5 | Примеры расчётов | 340 |

| | |
|--|-----|
| Глава 10 Радиационные свойства высокотемпературных сред | 345 |
| 10.1 Элементарные процессы излучения и поглощения света..... | 346 |
| 10.1.1 Свободно-свободные переходы..... | 348 |
| 10.1.2 Связанно-свободные переходы..... | 349 |
| 10.1.3 Связанно-связанные переходы..... | 350 |
| 10.1.4 Классическая теория тормозного поглощения..... | 351 |
| 10.1.5 Тормозное поглощение при рассеянии электронов на атомах..... | 358 |
| 10.1.6 Фоторекомбинация..... | 359 |
| 10.1.7 Излучение спектральных линий в плазме..... | 375 |
| 10.1.8 Сечения излучения и поглощения света в дискретном спектре..... | 376 |
| 10.1.9 Формы спектральных линий..... | 378 |
| 10.2 Колебательные и вращательные спектры молекул..... | 390 |
| 10.3 Оптические свойства высокотемпературного воздуха..... | 392 |
| 10.3.1 Фотоотрыв..... | 397 |
| 10.3.2 Атомарные и ионные сечения. Спектральные линии..... | 398 |
| 10.3.3 Коэффициенты поглощения..... | 401 |
| 10.3.4 Обсуждение результатов..... | 402 |
| 10.3.5 Коэффициенты поглощения..... | 402 |
| 10.4 Оптические и спектральные базы данных..... | 409 |
| Глава 11 Химические реакции в гиперзвуковых течениях газа и плазмы | 414 |
| 11.1 Классификация атомных и молекулярных реакций..... | 418 |
| 11.2 Кинетическое рассмотрение и квантовая теория реакций..... | 420 |
| 11.3 Квантовая теория химических реакций..... | 428 |
| 11.3.1 Адиабатическое приближение..... | 428 |
| 11.3.2 Неупругие столкновения..... | 433 |
| 11.3.3 Метод переходного состояния..... | 437 |
| 11.4 Мономолекулярные реакции..... | 438 |
| 11.4.1 Определение мономолекулярных реакций..... | 438 |
| 11.4.2 Электронные неадиабатические переходы..... | 439 |
| 11.4.3 Активация и дезактивация молекул..... | 443 |
| 11.5 Бимолекулярные реакции..... | 452 |
| 11.5.1 Дифференциальные сечения рассеяния частиц..... | 453 |
| 11.5.2 Классическая задача теории рассеяния..... | 454 |
| 11.6 Колебательная и вращательная кинетика..... | 458 |
| 11.6.1 Колебательная и вращательная кинетика, вызываемая столкновениями электронов с молекулами..... | 458 |
| 11.6.2 Неупругие столкновения электронов с частицами..... | 461 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 11.6.3 | Методы R -матрицы | 470 |
| 11.6.4 | Роль ядерной динамики в резонансных процессах | 471 |
| 11.7 | Столкновения тяжёлых частиц | 474 |
| 11.7.1 | Моделирование динамики столкновений | 474 |
| 11.7.2 | Столкновения молекула-молекула | 475 |
| 11.7.3 | Столкновения атомов и молекул | 482 |
| 11.8 | Кинетическая модель Суржикова | 491 |
| 11.8.1 | Расчёт констант равновесия | 491 |
| 11.8.2 | Расчёт констант скоростей прямых реакций | 495 |
| 11.8.3 | Аппроксимации Аррениуса констант скоростей процессов | 505 |
| 11.9 | Кинетические модели образования плазмы при движении летательных аппаратов в атмосфере | 508 |
| 11.9.1 | Кинетическая модель ионизации воздуха С.Т. Суржикова | 508 |
| 11.9.2 | Кинетическая модель ионизации воздуха Н.Л. Александрова | 510 |
| 11.9.3 | Кинетическая схема ионизации, рекомбинации и возбуждения | 515 |
| 11.10 | Плазмохимические реакции в электрическом поле | 517 |
| 11.10.1 | Ионизация в верхней атмосфере космическими лучами | 517 |
| 11.10.2 | Образование и свойства плазмы в электрическом поле | 524 |
| 11.11 | Каталитичность и процессы взаимодействия газа с поверхностью | 539 |
| 11.11.1 | Рекомбинация атомов кислорода, азота, водорода и оксида углерода | 542 |
| 11.11.2 | Механизмы и экспериментальные данные по рекомбинации на поверхности | 550 |
| 11.11.3 | Кинетический метод Монте-Карло для моделирования реакций на поверхности | 553 |
| 11.11.4 | Перспективы работ по химии, физике плазмы и каталитичности поверхностей в задачах ГЛА | 558 |

Глава 12 Гидродинамика высокотемпературных сред

| | | |
|--------|---|-----|
| 12.1 | Гидродинамическое описание высокотемпературных сплошных сред | 560 |
| 12.1.1 | Общее уравнение переноса | 562 |
| 12.1.2 | Уравнения диффузии компонент | 563 |
| 12.1.3 | Уравнение сохранения электрического заряда | 564 |
| 12.1.4 | Уравнение движения | 564 |
| 12.1.5 | Уравнения Максвелла | 566 |

| | | |
|--|---|------------|
| 12.1.6 | Уравнение энергии | 566 |
| 12.1.7 | Полная система уравнений гидродинамики | 573 |
| 12.2 | Термодинамика необратимых процессов | 574 |
| 12.2.1 | Векторная часть производства энтропии | 577 |
| 12.2.2 | Тензорная часть производства энтропии | 581 |
| 12.3 | Гидродинамические модели | 584 |
| 12.3.1 | Локально-химически равновесная среда | 584 |
| 12.3.2 | Частичное локальное равновесие и редуцирование уравнений химической кинетики | 585 |
| 12.4 | Многожидкостная гидродинамика | 597 |
| 12.4.1 | Релаксационные явления | 597 |
| 12.5 | Граничные и внешние условия в гидродинамике | 603 |
| 12.5.1 | Общее граничное условие | 603 |
| 12.5.2 | Кинематические граничные условия | 608 |
| 12.6 | Перенос энергии излучением в гидродинамике | 609 |
| 12.6.1 | Уравнение переноса излучения | 609 |
| 12.6.2 | Оптически тонкий газ ($\kappa_\omega \ll 1$) | 614 |
| 12.6.3 | Оптически толстый газ ($\kappa_\omega l \gg 1$) | 616 |
| 12.6.4 | Росселандов пробег для тормозных процессов | 619 |
| 12.6.5 | Росселандов пробег для фотоионизации | 619 |
| 12.6.6 | Степени черноты, росселандово и плашковское средние | 620 |
| 12.7 | Многогрупповые методы моделирования переноса излучения | 621 |
| 12.7.1 | Некоторые зарубежные специализированные коды | 622 |
| 12.7.2 | Многогрупповые методы в расчётах излучения газовых и гетерогенных сред | 625 |
| 12.7.3 | Обоснование метода расчёта теплового потока | 630 |
| Глава 13 Устойчивость гиперзвуковых течений | | 633 |
| 13.1 | Гидродинамические, акустические и тепловые неустойчивости в гиперзвуковых течениях | 633 |
| 13.1.1 | Теорема о расщеплении мод колебаний и волн | 633 |
| 13.2 | Линейная теория устойчивости | 636 |
| 13.2.1 | Метод малых возмущений | 636 |
| 13.2.2 | Вихревая, акустическая и энтропийная моды возмущений | 639 |
| 13.2.3 | Физические причины расщепления мод | 646 |
| 13.3 | Ламинарно-турбулентный переход | 647 |
| 13.3.1 | Механизмы перехода к турбулентности | 648 |
| 13.3.2 | Виды волн неустойчивости в пограничном слое | 652 |
| 13.4 | Подходы к определению устойчивости пограничного слоя | 653 |
| 13.4.1 | Методы теории устойчивости | 653 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 13.4.2 | О нестационарном росте возмущений в теории устойчивости | 657 |
| 13.4.3 | Инженерно-практические методы | 659 |
| 13.5 | Ламинарно-турбулентный переход при сверх- и гиперзвуковых скоростях | 669 |
| 13.5.1 | Особенности высокоскоростных потоков | 669 |
| 13.5.2 | Устойчивость высокоскоростных потоков | 670 |
| 13.5.3 | Возмущения в гиперзвуковом потоке | 671 |
| 13.6 | Факторы воздействия на ламинарно-турбулентный переход | 674 |
| 13.6.1 | Внешние факторы | 675 |
| 13.6.2 | Внутренние факторы | 677 |
| 13.7 | Инженерная модель ламинарно-турбулентного перехода в высокоскоростном потоке | 681 |

Глава 14 Турбулентное движение гиперзвуковых течений 686

| | | |
|---------|---|-----|
| 14.1 | Основные определения и особенности турбулентности | 686 |
| 14.1.1 | Общие характеристики турбулентного движения | 686 |
| 14.1.2 | Причины возникновения турбулентности | 688 |
| 14.1.3 | Постановка задач в теории турбулентности | 689 |
| 14.1.4 | Турбулентность сред с переменными свойствами | 692 |
| 14.2 | Неоднородное турбулентное движение среды | 692 |
| 14.2.1 | Уравнения Рейнольдса | 693 |
| 14.2.2 | Турбулентные коэффициенты переноса | 697 |
| 14.2.3 | Полуэмпирическая «равновесная» теория турбулентности | 698 |
| 14.2.4 | Масштаб турбулентности | 704 |
| 14.3 | Модели турбулентности | 709 |
| 14.3.1 | Осреднение по Рейнольдсу | 709 |
| 14.3.2 | Осреднение по Фавру | 711 |
| 14.3.3 | Приближение Буссинеска о турбулентных напряжениях | 712 |
| 14.3.4 | Турбулентный пограничный слой | 713 |
| 14.3.5 | Алгебраические модели турбулентности | 718 |
| 14.3.6 | Модель Себеси–Смита | 719 |
| 14.3.7 | Модель Болдуина–Ломакса | 720 |
| 14.3.8 | Турбулентные модели для струй и следов | 721 |
| 14.3.9 | Модели турбулентности с одним уравнением | 722 |
| 14.3.10 | Модель Спаларта–Аллараса | 722 |
| 14.3.11 | Турбулентные модели с учётом вращения и кривизны линий тока | 724 |
| 14.3.12 | Модели турбулентности с двумя уравнениями | 726 |

| | | |
|-----------------|---|------------|
| 14.3.13 | Модель $k-\varepsilon$ | 729 |
| 14.3.14 | Модель $k-\omega$ | 731 |
| 14.3.15 | Модель переноса сдвигового напряжения | 732 |
| 14.3.16 | Модель реинормгруппы | 734 |
| 14.3.17 | Поправки на сжимаемость в сдвиговых слоях | 735 |
| 14.3.18 | Дифференциальные и алгебраические модели рейнольдсовых напряжений | 736 |
| 14.3.19 | Алгебраическая модель рейнольдсовых напряжений | 740 |
| 14.4 | Моделирование турбулентности в горячих сверхзвуковых струйных течениях | 742 |
| 14.4.1 | Введение | 742 |
| 14.4.2 | Физико-математическая модель | 743 |
| 14.4.3 | Экспериментальные данные | 751 |
| 14.4.4 | Результаты расчётов | 752 |
| 14.5 | Некоторые специальные типы турбулентности | 755 |
| 14.5.1 | Взаимодействие турбулентного движения с тепловым излучением | 758 |
| 14.5.2 | Турбулентность многокомпонентных реагирующих сред | 763 |
| Глава 15 | Горение в сверхзвуковых потоках | 766 |
| 15.1 | Основные понятия и определения в теории горения | 766 |
| 15.1.1 | Теплота сгорания | 767 |
| 15.1.2 | Адиабатическая температура горения | 768 |
| 15.1.3 | Скорости химических реакций горения | 770 |
| 15.2 | Механизмы горения метана | 772 |
| 15.3 | Метод полного и неполного локального химического равновесия в горении метана в воздухе | 777 |
| 15.3.1 | Результаты и обсуждение | 779 |
| 15.4 | Теория ламинарного пламени перемешанного топлива | 781 |
| 15.4.1 | Тепловая теория ламинарного пламени | 783 |
| 15.4.2 | Ламинарная скорость горения | 786 |
| 15.4.3 | Скорость распространения пламени | 789 |
| 15.5 | Устойчивость ламинарного пламени и пределы распространения | 797 |
| 15.6 | Методы измерения скорости горения | 801 |
| 15.7 | Турбулентное горение | 806 |
| 15.7.1 | Турбулентное горение перемешанных топлив | 809 |
| 15.7.2 | Струйные диффузионные пламена в воздухе | 811 |
| 15.7.3 | Карта режимов горения | 817 |
| 15.7.4 | Обобщённая модель турбулентных струй | 821 |
| 15.8 | Инертные турбулентные струи | 826 |
| 15.9 | Сверхзвуковые режимы турбулентного горения | 832 |
| 15.9.1 | Принцип суперпозиции при горении | 833 |

| | | |
|--|--|------------|
| 15.9.2 | Механизмы интенсификации скорости горения смеси топливных газов | 836 |
| 15.10 | От дефлаграции до детонации | 837 |
| 15.11 | Исследования натуральных камер сгорания | 842 |
| 15.11.1 | Горение газообразных топливных струй из сопел | 842 |
| 15.11.2 | Взаимодействие факелов горения в многосопловых блоках | 843 |
| 15.11.3 | Детонационные волны в водородо-воздушной смеси | 847 |
| 15.12 | Горение в закрученном потоке | 851 |
| 15.12.1 | Критерии оценки степени закрутки потока | 851 |
| 15.12.2 | Основные эффекты закрученных течений, прямоточные закрученные пламена | 856 |
| 15.12.3 | Горение в противоточных закрученных течениях | 867 |
| 15.13 | Горение в сверхзвуковых потоках | 879 |
| 15.13.1 | Основные понятия в гиперзвуковом горении | 879 |
| 15.13.2 | Система уравнений турбулентного течения химически реагирующей газовой смеси | 880 |
| 15.13.3 | Химическая кинетика | 882 |
| 15.13.4 | Модель турбулентности | 887 |
| 15.13.5 | Апробация методики | 889 |
| 15.13.6 | Численное исследование модельного гиперзвукового прямоточного воздушно-реактивного двигателя | 893 |
| 15.13.7 | Влияние турбулентности на скорости химических реакций | 903 |
| 15.13.8 | Осреднённые скорости реакций, скорости образования компонентов | 907 |
| 15.14 | Численное моделирование турбулентного горения струй | 920 |
| 15.14.1 | Введение | 920 |
| 15.14.2 | Физическая и математическая модели | 921 |
| 15.14.3 | Численный метод | 925 |
| 15.14.4 | Сравнение результатов расчётов с экспериментальными данными | 927 |
| Заключение | | 934 |
| Список литературы ко второй части | | 936 |