

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	10
Введение	13
Глава 1. Основные результаты исследований по перспективным методам тепловой защиты теплонагруженных поверхностей при обтекании их высокотемпературным газом.	23
1.1. Анализ современного состояния работ по перспективным методам тепловой защиты гиперзвуковых летательных аппаратов (ГЛА)	23
1.1.1. Радиационно-кондуктивный метод защиты несущих поверхностей при обтекании сверхзвуковым потоком	25
1.2. Обзор экспериментальных и теоретических работ	28
1.2.1. Исследования особенностей обтекания тел сложной геометрической формы	29
1.2.2. Экспериментальные исследования сверхзвукового обтекания тел в условиях распределенного вдува газа через их поверхность	31
1.3. Теоретическое исследование сверхзвукового обтекания сложных тел в условиях поверхностного массообмена.	41
1.4. Математическое моделирование влияния вдува химически активных компонентов на неравновесное течение в пограничном слое	51
1.5. Постановка задачи	55
Глава 2. Физические основы теории и математическая формулировка задачи обтекания ГЛА с поверхностным массообменом. Постановка задач и численные методы решения.	57
2.1. Физические особенности обтекания сложных тел с различным расположением пронизываемых участков.	58
2.1.1. Распределение давления по поверхности тел сложной формы в условиях распределенного вдува газа	61
2.2. Математическая формулировка задачи обтекания ГЛА с интенсивным поверхностным массообменом. Постановка задачи.	65
2.2.1. Реализация разностной схемы	68
2.3. Численная методика решения упрощенных уравнений Навье–Стокса	69

2.3.1. Разностные схемы для расчета стационарных течений вязкого однородного сжимаемого газа при обтекании затупленных тел с поверхностным массообменом	71
2.3.2. Разработка алгоритма и программа для численного решения	73
2.4. Методика численного расчета сверхзвукового обтекания тел в условиях интенсивного поверхностного массообмена в рамках модели идеальной жидкости.	77
2.4.1. Численная методика расчета обтекания ГЛА в условиях интенсивного поверхностного массообмена	79
2.4.2. Реализация метода установления при решении системы уравнений газовой динамики в рамках уравнений Эйлера	80
2.4.3. Результаты численных расчетов при обтекании тел сложной конфигурации	85
2.5. Математическое моделирование неравномерно распределенного интенсивного поверхностного массообмена	90
2.6. Выводы	96
Глава 3. Экспериментальные и теоретические исследования динамических характеристик ГЛА с поверхностным массообменом в сложной газодинамической обстановке	98
3.1. Экспериментальное исследование влияния массообмена на аэродинамические характеристики ГЛА сложной формы	99
3.2. Моделирование взаимодействия струйного органа управления ГЛА со сверхзвуковым потоком газа в условиях поверхностного массообмена	108
3.2.1. Математическая модель, описывающая плоское течение невязкого сжимаемого газа	110
3.3. Схема расщепления для уравнений газовой динамики в переменных ρ , ρv , p	111
3.3.1. Реализация разностной схемы в дробных шагах	116
3.4. Решение разностной краевой задачи методом прогонки	118
3.5. Метод расщепления при расчете плоского течения невязкого сжимаемого газа	119
3.6. Численное решение задачи обтекания струйного органа управления. Постановка граничных условий	123
3.7. О расчете передней отрывной зоны	128
3.8. Выводы	133
Глава 4. Исследование нестационарных газодинамических характеристик колеблющегося тела вращения в условиях поверхностного массообмена	135
4.1. Физическая постановка задачи	135

4.2. Экспериментальные установки и модели для исследования нестационарных характеристик летательного аппарата с интенсивным поверхностным массообменом	136
4.3. Метод экспериментального определения нестационарных аэродинамических характеристик моделей с поверхностным массообменом	142
4.3.1. Определение коэффициентов вращательных производных аэродинамического момента модели с интенсивным поверхностным массообменом	145
4.4. Система уравнений для определения нестационарных характеристик колеблющихся тел в рамках линейной теории	149
4.5. Численное исследование нестационарного обтекания модели с интенсивным поверхностным массообменом	153
4.5.1. О распределении давления около колеблющегося в потоке тела	155
4.6. Обсуждение результатов исследования	163
4.7. Выводы	172
Глава 5. Численное решение задачи теплообмена диссоциированного неравновесного пограничного слоя с поверхностью при наличии массообмена	174
5.1. Учет влияния вязкостных эффектов на обтекание комбинированных ГЛА	174
5.1.1. Исследование аэродинамических характеристик ГЛА с учетом вязкостных эффектов	181
5.1.2. Влияние степени турбулентности потока на аэродинамические характеристики ГЛА	182
5.2. Распределение параметров в пристеночной части двумерного пограничного слоя	184
5.2.1. Расчет характеристик пограничного слоя тела вращения с изломами образующей при стационарном обтекании	185
5.3. Гомогенные и гетерогенные каталитические реакции химической кинетики в пограничном слое	193
5.4. Кинетика реакций в диссоциированном пограничном слое и на поверхности каталитической стенки	196
5.4.1. Уравнения пограничного слоя при наличии неравновесных физико-химических процессов	199
5.5. Приведение системы уравнений пограничного слоя к безразмерной форме в переменных Дородницына–Лиза	205
5.5.1. Приведение уравнений химической кинетики газов к стандартной форме	207
5.6. Система уравнений и граничные условия для смеси газов на линии торможения при наличии массоподвода и каталитических реакций	209

5.7. Численное интегрирование уравнений пограничного слоя. Результаты расчетов	211
5.8. Выводы	217
Глава 6. Математические модели и методы исследований течений многофазных сред у сублимирующих поверхностей	219
6.1. Экспериментальные исследования по влиянию поверхностного массообмена на распределение тепловых потоков по поверхности ЛА	220
6.2. Описание модели и условия эксперимента	220
6.3. Методика измерений тепловых потоков и обработка результатов испытаний	222
6.3.1. Погрешности измерений тепловых потоков	223
6.4. Экспериментальные исследования распределения тепловых потоков по поверхности гиперзвуковых летательных аппаратов	224
6.4.1. Анализ экспериментальных данных по распределению тепловых потоков по поверхности ГЛА	228
6.5. Физическая модель многофазного пограничного слоя	232
6.5.1. Система дифференциальных уравнений многофазного пограничного слоя	234
6.5.2. Приведение системы дифференциальных уравнений двухфазного пограничного слоя к безразмерному виду	236
6.6. Основы теплофизического описания процесса образования жидкой пленки. Физические модели.	240
6.7. Численное моделирование процессов абляции и сублимации ТЗП при обтекании ГЛА	241
6.8. Конечно-элементный метод решения задачи обтекания аблирующей ТЗП в сложной газодинамической обстановке	248
6.8.1. Решение задачи теплопроводности в пористой стенке	252
6.8.2. Решение задачи теплопроводности в газовом зазоре	253
6.8.3. Решение уравнений течения газа в зазоре	255
6.9. Выводы	257
Глава 7. Исследование течения в донной области моделей ГЛА в условиях поверхностного массообмена	259
7.1. Физическая картина течения	259
7.2. Математическая модель. Уравнения сохранения	262
7.3. О граничных условиях	264
7.4. Общий баланс энергии	264
7.5. Сопряжение решения с решением для невязкого потока	266
7.6. Результаты для случая отсутствия вдува газа в донную область	268

7.7. Искажение профиля в точке отрыва	269
7.8. Тепловой поток в донную часть тела	271
7.9. Результаты для случая вдува газа в донную область	275
7.10. Обсуждение результатов	278
7.11. Выводы	280
Заключение	281
Список литературы	286