ЦЕНТРАЛЬНЫЙ АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени профессора Н.Е. Жуковского

УДК 533.6.011.8 На правах рукописи

Г орелов Сергей Львович

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОТЕРМОДИНАМИКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В ВЕРХНИХ СЛОЯХ АТМОСФЕРЫ

01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Москва - 2016 год

3

Содержание

Введение

1. Уравнение Больцмана. Модели взаимодействия 9

1.1 Уравнение Больцмана и его модели 9

1.2 Упругое взаимодействие 11

1.3 Неупругое взаимодействие 18

2. Численные методы решения уравнения Больцмана 41

2.1 Регулярные методы 43

2.2 Методы Монте-Карло 45

2.3 Метод прямого статистического моделирования 53

3. Приближенные методы решения задач динамики разреженного газа 65

3.1 Локальные методы 67

3.2 Мостовая схема 70

3.3 Самоподобная интерполяция 72

4. Аналитические решения задач динамики разреженного газа 76

4.1 Свободномолекулярное течение по коротким трубам 77

4.2 Течение разреженного газа между параллельными пластинами 81

4.3 Теплопередача в плоском и цилиндрическом течении Куэтта 86

5. Гиперзвуковая аэротермодинамика 101

5.1 Плоские задачи 102

5.2 Пространственные течения 111

5.3 Теплопередача в критической точке 125

6. Некоторые приложения 131

6.1 Падение тел на Землю из дальнего космоса 131

6.2 Падение сферического тела на Марс 146

6.3 Проект “Фобос-грунт” 154

6.4 Проект “Экзо Марс” 167

Заключение 184

Литература 186

Заключение

Сформулируемосновныерезультатыработы

 ПредложенымоделивзаимодействиямолекулсвнутреннимистепенямисвободыприспособленныекрасчетамметодомпрямогостатистическогомоделированияПСМаименномодельдвухточечныхцентровотталкиваниядляучетавращательныхстепенейсвободымолекулимодельшероховатыхсферпеременногодиаметрамодельдляучетавращательныхколебательныхстепенейсвободыидиссоциации

 ПредложенметодМонтеКарлопробныхчастицдлярешениялинейныхзадачдинамикиразреженныхгазовРешенрядподобныхзадачОбнаруженэффектизменениянаправлениясилыдействующейнасферическуючастицувзадачеотермофорезе

 Предложенновыйметодсамоподобнойинтерполяциидляприближенногоаналитическогорешениязадачдинамикиразреженногогаза

 АналитическирешенрядзадачметодомсамоподобнойинтерполяцииаименнозадачаосвободномолекулярномтечениипокороткимтрубаммедленнымтеченииКуэттаиПуазейлятеплопередачевплоскомицилиндрическомтеченииКуэттасразнымитемпературамиповерхностейСущестенныммоментомявляетсяпеременазнакатепловогопотокаприизменениичислаКнудсена

 ИсследованыаэродинамическиехарактеристикиитепловыепотокиприобтеканиителпростойформыгиперзвуковымпотокомразреженногогазаИсследовановлияниевнутреннихстепенейсвободыиграничныхусловийнааэродинамическиехарактеристикипластинывгиперзвуковыхпотокахразреженногогазаПолученывеличиныаэродинамическиххарактеристиктреугольныхпластиниконусовподугломатакиПроизведенырасчетытепловогопотокавкритическойточкесферыинакритическойлиниицилиндрасучетомвращательныхколебательныхстепенейсвободыидиссациации

 РассчитаныаэродинамическиехарактеристикисферыприполетеватмосферахЗемлииМарсаВычисленытраекторииспускасферыпривходев



атмосферыЗемлииМарсасовторойкосмическойскоростьюдляразныхугловвходаСделаныоценкитепловыхпотоковвкритическихточкахТамжеприводятсярасчетыаэродинамическиххарактеристикитепловыхпотоковдляреальныхспускаемыхаппаратовпопроектам“Фобосгрунт”и“ЭкзоМарс”