

На правах рукописи



Минюшкин Дмитрий Николаевич

**Математическое моделирование изменения формы
метеороидного тела при аэродинамическом нагреве**

Специальность 1.1.9. —
«Механика жидкости, газа и плазмы»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: **Молчанов Александр Михайлович**,
доктор технических наук, профессор кафедры 204 «Авиационно-космическая теплотехника» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты: **Мартыненко Сергей Иванович**,
доктор физико-математических наук,
лаборатории №8 ОИВТ РАН,
ведущий научный сотрудник

Лаптев Игорь Вячеславович,
кандидат физико-математических наук,
АО ГНЦ «Центр Келдыша»,
начальник лаборатории

Ведущая организация: Акционерное общество «Военно-промышленная корпорация „Научно-производственное объединение машиностроения“» (АО «ВПК „НПО машиностроения“»)

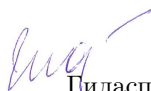
Защита состоится 30 июня 2023 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета 24.2.327.08 при Московском авиационном институте (национальный исследовательский университет) по адресу: Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва, 125993.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте МАИ по ссылке:
https://mai.ru/events/defence//?ELEMENT_ID=172213#

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва, 125993, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.327.08.

Автореферат разослан: «___» _____ 2023,г.
Телефон для справок: +7 (499) 158-29-77.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.327.08,
д-р физ.-мат. наук



Гидасов Владимир Юрьевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Исследования определяются необходимостью проведения изучения влияния высоких тепловых и силовых нагрузок на форму метеоритов. Изменяющаяся в процессе движения форма метеорита влияет на его аэродинамические характеристики. Более точная оценка аэродинамических характеристик метеорита позволяет с большей точностью вычислять его траекторию и место падения на поверхность Земли. Для метеоритных тел улучшение расчёта его лётных характеристик — это прежде всего расчёт сложного метеоритного тела, с выбоинами, кавернами в трёхмерной постановке. Отличительной особенностью движения метеоритов в атмосфере является то, что движение на высоких скоростях вызывает не только значимые силовые нагрузки, но и сильный аэродинамический нагрев. Высокие тепловые и силовые нагрузки на поверхность метеорита вызывают разрушение материала метеорита и меняют его форму, а, следовательно, изменение его лётных характеристик.

Таким образом, перед исследователем движения метеорита в атмосфере стоит задача рассчитать движение по траектории с учётом разрушения материала и изменения формы. Натурное моделирование разрушения материала возможно на наземных стендах, также как и моделирование тепловых и силовых нагрузок, но оно не может дать всего разнообразия возможных режимов движения в атмосфере, в то время как лётные испытания являются очень дорогостоящими. Поэтому при расчёте движения метеорита ценность математического моделирования сильно возрастает. Расчёт движения метеорита с учётом изменения его формы, проводимая в ручную или автоматически, требует очень большого количества расчётов. Для каждой точки траектории необходимо провести оценку аэродинамических и тепловых нагрузок на аппарат, расчёт прогрева и разрушения материала и расчёт изменения формы метеорита. С учётом того, что точек траектории может быть много, то из-за изменения формы внешний газодинамический расчёт необходимо проводить для каждой точки траектории — даже один расчёт по одной траектории является очень ресурсозатратным.

Метеоритная поверхность может быть сложной, в ней могут присутствовать выемки, впадины, каверны, бугры различных форм. Сам метеорит в различных точках траектории может быть расположен под разным углом относительно направления движения. Таким образом для качественной оценки силовых и тепловых нагрузок необходимо решать задачу в трёхмерной постановке, что дополнительно увеличивает ресурсоёмкость задачи.

Таким образом, для исследования необходим надёжный и относительно незатратный метод расчёта изменения метеоритной формы при

движении по траектории в трёхмерной постановке. По этой причине работа является актуальной.

Степень разработанности темы.

Разработкой методов расчёта изменения метеоритной формы под действием тепловых нагрузок занимались много авторов начиная с 60-х годов 20-го века. В настоящее время созданы математические модели разрушения материала под действием тепловых и силовых нагрузок, созданы компьютерные коды, реализующие различные математические модели разрушения материала. Для моделирования разрушения материала метеорита и изменения его формы необходимо три принципиальные составляющие:

- 1) моделирование тепловых и силовых нагрузок;
- 2) моделирование дробления метеоритов;
- 3) моделирование разрушения, уноса материала;
- 4) моделирования изменения формы метеорита при его разрушении.

Метеоритной теме в целом посвящено много работ В.П. Стулова, в которых введена типизация метеоритов, описаны физические явления, сопровождающие их движение в атмосфере. В работах Г.А. Тирского детально исследованы основные физические явления, представлена модель дробления метеоритов, исследовано поведение группы метеоритов.

Одним из фундаментальных составляющих проблемы разрушения метеоритов является горение или унос поверхности метеорита под действием тепловых и силовых нагрузок. Поэтому модели разрушения материалов является основным входным параметром моделирования изменения формы метеорита. Моделированию разрушения материалов посвящено много работ, основными из которых являются монографии Ю.В. Полежаева, Ф.Б. Юревича, Д.С. Михатулина, Д.Л. Ревизникова.

Оценки тепловых и силовых нагрузок в настоящее время проводятся с помощью решения уравнений Навье-Стокса, использованием инженерных методов, таких как метод эффективной длины. Метод эффективной длины был предложен академиком В.С. Авдеевским, развивался в работах В.В. Лунёва, Б.А. Землянского, В.И Власова, С.В. Журина. Метод требует в качестве входных значения полей давления, температуры и скорости на внешней границе пограничного слоя, которые могут быть получены при помощи инженерных методов или невязкого CFD расчёта.

Горение или унос материала метеорита вызывает изменение его формы. Первая теоретическая работа по исследованию формы тел, разрушающихся под действием аэродинамического нагрева, была опубликована И.Н. Мурзиновым. В работе осуществлено одно из первых исследований процесса уноса лобовой части наконечника, давление на которой удовлетворительно описывается ньютоновской теорией. Дальнейшее развитие исследований процессов изменения формы теплозащитного материала было проведено в работах В.Г. Коняева. В.Г. Коняев предложил уравнение изменения формы аблирующих тел — уравнение обгара. В работе В.В.

Лунёва получено интегродифференциальное уравнение движения поверхности уносимого материала. В работах В.Г. Воронкина, В.В. Лунёва, А.Н. Никулина, И.Н. Полякова, М.В. Брыкина приведены результаты исследований свойств определенного типа решений уравнения обгара, называемых стационарными формами. Стационарная форма является результатом длительного разрушения поверхности метеорита, когда унос материала может быть соизмерим с его линейными размерами. Существенным развитием темы были работы В.В. Знаменского. В упрощённой постановке получены основные типы стационарных форм, исследована устойчивость решения уравнения обгара при расчёте стационарных форм. Устойчивостью расчёта обгарной формы также занимались Y.-K. Chen, F. S. Milos, Toshiyuki Suzuki, Takeharu Sakai, Tetsuya Yamada. В настоящее время создано много отечественных и зарубежных авторских вычислительных кодов, как одномерных, двумерных, так и трёхмерных.

Целью данной работы является разработка вычислительного метода для моделирования разрушения метеоритов и метеороидных тел при аэродинамическом нагреве. Целями диссертационной работы являются:

- 1) создание эффективного и практически применимого численного метода расчёта тепловых нагрузок на поверхность метеороидного тела при быстром движении в атмосфере в трёхмерной постановке;
- 2) создание численного метода для расчёта прогрева и уноса поверхности метеорита;
- 3) реализация разработанных методов в виде программных кодов;
- 4) проведение расчётов в рамках программного комплекса;
- 5) демонстрация эффективности подхода на примере расчетов разрушения метеороидного тела сложной формы в трёхмерной постановке.

Научная новизна:

1) Разработан новый метод расчёта прогрева и уноса поверхности метеорита в результате аэродинамического нагрева при движении по траектории на основе модифицированного метода эффективной длины и решения вспомогательной задачи деформации твёрдого тела в трёхмерной постановке. Отличительной особенностью метода является его вычислительная устойчивость, способность моделировать тепловые нагрузки и рассчитывать изменение формы на телах сложной формы — с выбоинами и уступами;

2) На языке программирования C++ разработан авторский программный комплекс, в котором был реализован вычислительный метод расчёта прогрева и уноса в трёхмерной постановке.

Практическая значимость

Разработанная методология и программные коды позволяют за относительно небольшое время оценить изменение формы метеорита в результате аэродинамического нагрева при движении в атмосфере.

Методология и методы исследования.

В работе применялась традиционная методология вычислительного эксперимента. Реализован численный метод получения тепловых потоков в результате аэродинамического нагрева — параметры внешнего обтекания получались решением уравнений Эйлера на основе конечно-объемных схем на гибридных неструктурированных сетках с использованием ряда подходов, позволяющих моделировать течение около выступающих элементов. Тепловые потоки оценивались с помощью модифицированного метода эффективной длины, для расчёта изменения формы метеороидного тела решалась вспомогательная задача деформации твёрдого тела. Успешная верификация и валидация реализованных методов и их апробация на ряде задач подтвердила применимость разработанной методики для проведения достоверных вычислительных экспериментов по оценке изменения формы метеороидного тела при аэродинамическом нагреве.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) Метод оценки тепловых потоков при аэродинамическом нагреве на основе модификации метода эффективной длины;
- 2) Метод расчёта прогрева и уноса материала метеороидных тел на основе несопряжённого подхода;
- 3) Результаты расчёта, которые подтверждают корректность использования разработанного метода и его программной реализации для моделирования прогрева и уноса при аэродинамическом нагреве;
- 4) Результаты расчёта прогрева и изменения формы при разрушения поверхности метеороидного тела в процессе движения в атмосфере в трёхмерной постановке. Расчёты проводились с помощью разработанного авторского программного комплекса.

Достоверность полученных результатов обеспечена строгостью используемого математического аппарата и подтверждается сравнением результатов вычислительных экспериментов с известными в литературе экспериментальными и расчетными данными.

Апробация работы.

Материалы диссертации докладывались на следующих конференциях и форумах:

- 1) Всероссийская школа-семинар "Современные проблемы аэрогидродинамики", МГУ, Сочи, 2014;
- 2) 10-я Всероссийская школа-семинар "Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем", АФМ, 2016;
- 3) Семинар проф. В.В. Лунева и Ю.М. Липницкого, ЦНИИмаш, 2016;
- 4) Семнадцатая Международная школа-семинар "Модели и методы аэродинамики", Евпатория, ЦАГИ, 2017;
- 5) Семинар проф. В.В. Лунева и Ю.М. Липницкого, ЦНИИмаш, 2018;
- 6) 21-я международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам, 2019, Алушта, Крым;

7) Международный военно-технический форум "Армия-2022". Круглый стол: "Актуальные вопросы совершенствования средств автоматизации Воздушно-космических сил";

8) XIV Международная конференция по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли, 2022, Алушта, Крым.

Личный вклад.

Все исследования, изложенные в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. В третьей главе представлены результаты работы в соавторстве с И.А. Крюковым. Вклад автора диссертации в работы оценивается как основной — постановка задачи, получение и обработка итоговых результатов расчёта по прогреву и уносу однородного материала, проведение анализа полученных результатов и подготовка данных, написание текста работ. Личный вклад И.А. Крюкова состоит в расчёте газодинамического поля, получение результатов по тепловым нагрузкам и оценивается в 30 процентов.

Публикации.

Основные результаты по теме диссертации изложены в 8 печатных работах из которых 3 входят в перечень ВАК либо проиндексированы в Scopus и Web Of Science.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируется цель исследования, а также кратко излагается содержание глав и параграфов.

В первой главе проводится аналитический обзор состояния исследования в области моделирования уноса материалов метеороидных тел. Кратко описаны работы по экспериментальному и теоретическому исследованию процессов разрушения материала под действием тепловых и силовых нагрузок. Приведены работы по исследованию сильного уноса, сравнимого с размерами метеорита. Сделан обзор существующих компьютерных кодов по моделированию изменения формы при разрушении материала.

Во второй главе приведено описание реализации вычислительного метода расчёта тепловых и силовых нагрузок при аэродинамическом нагреве, приведены результаты валидационных расчётов.

В разделе 2.1 описан метод получения силовых нагрузок на метеороидное тело на основе численного решения системы уравнений Эйлера с искусственной вязкостью. Искусственная вязкость используется для того, чтобы обеспечить устойчивость решения в окрестности точки растекания, то есть для подавления численной неустойчивости — «корбункулов».

В разделе 2.2 представлен модифицированный метод эффективной длины, который используется для получения тепловых нагрузок при высокоскоростном движении метеорита. Поверхность метеорита может быть «негладкой», с изломами, кавернами, выбоинами. Для того, чтобы обеспечить устойчивость счёта по таким поверхностям, были предложены модификации метода эффективной длины: вместо интегрирования вдоль линии тока использовалось интегрирование по полю. В уравнение были добавлены нестационарный и диффузионный члены. В разделе изложен вывод уравнений модифицированного метода и приведён способ его численного решения.

Раздел 2.3 посвящён валидации модифицированного метода эффективной длины. Валидация проводилась на двух примерах — расчёт теплового потока на сфере и на цилиндре со скруглёнными кромками. Исследовалась зависимость решения в окрестности критической точки от размера ячейки и порядка аппроксимации конвективного члена. Первый валидационный тест — тепловой поток на сфере.

Сфера радиуса $R = 1$ м помещена в сверхзвуковой поток. Давление $P = 300$ Па, температура $T = 250$ К, молярная масса газа = 0.029 кг/моль (параметры атмосферы на высоте 40 км), число Маха 6. Показано, что качество расчёта теплового потока в окрестности критической точки повышается с уменьшением размера ячеек и повышением порядка аппроксимации, см. рисунок 1. На рисунке k — отношение характерного размера ячейки к радиусу сферы.

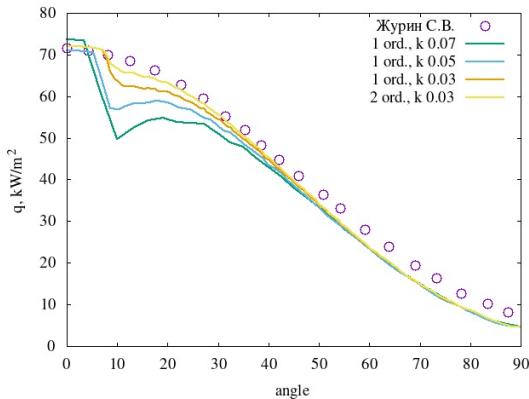


Рис. 1 — Распределение ламинарного теплового потока на сфере радиуса 1 м в зависимости от характерного размера ячеек для первого и второго порядка аппроксимации конвективного члена.

Валидационный расчёт геометрии с рёбрами проводился на примере цилиндра с затупленными кромками. Цилиндр с кромками различного радиуса помещен в сверхзвуковой поток. Параметры набегающего потока: число Маха 10.5, давление и температура в форкамере соответственно 123 атм и 1160 К. Результаты расчетов для разных радиусов скругления приведены на рисунке 2. Расчеты проведены со вторым порядком аппроксимации конвективного члена. Здесь k — отношение характерного размера ячейки к радиусу цилиндра.

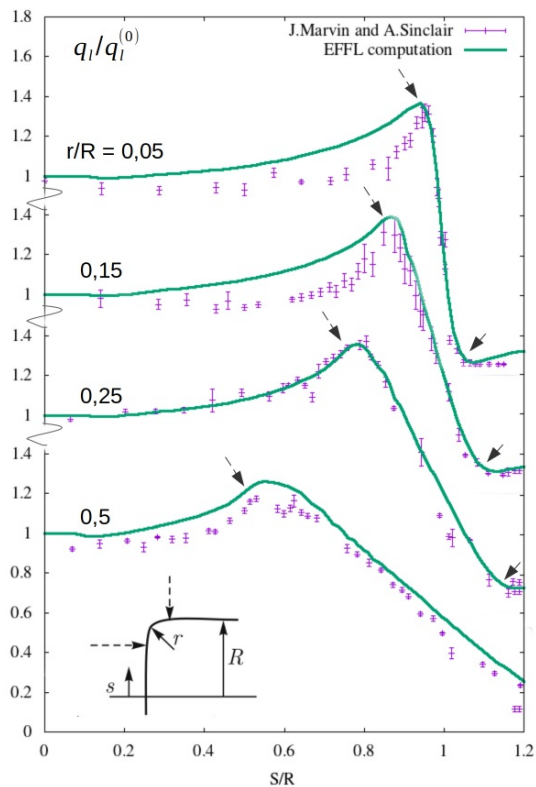


Рис. 2 — Распределение ламинарных тепловых потоков по диску со скругленными угловыми точками. Стрелки — начало и конец скругления

В разделе 2.4 представлена демонстрация устойчивой работы метода; проведен расчет тела сложной геометрии, в которой присутствуют впадины, выщерблены, выпуклости и т.п.

Форма сложного метеороидного тела показана на рисунке 3.

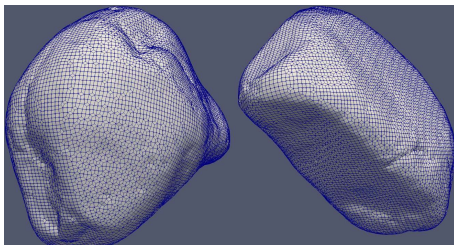


Рис. 3 — Форма сложного метеороидного тела

Параметры внешнего набегающего потока: число $M=10.5$, давление и температура соответственно 123 атм и 1160 К.

Результаты расчета ламинарного и турбулентного теплового потока представлены на рисунках 4 и 5.

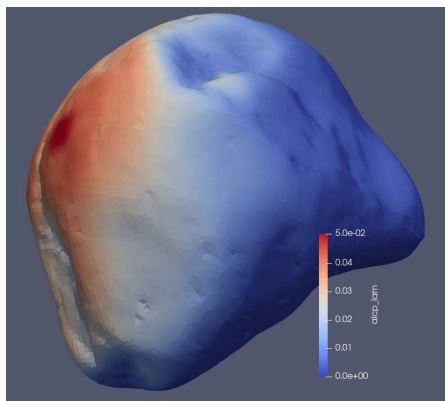


Рис. 4 — Распределение ламинарного коэффициента теплообмена по поверхности сложного метеороидного тела

Раздел 2.5 содержит описание результатов расчёта теплового потока сложного тела. В качестве объекта выбрана модель Шаттла. Для данного объекта можно провести сравнение результатов расчёта с экспериментом, при этом показав устойчивость работы модифицированного метода эффективной длины на сложной геометрии. Расчёт проводился для режима движения со скоростью $M=9.15$, давление и температура набегающего потока 100 Н/м² и 260 К соответственно, угол атаки 34.8°.

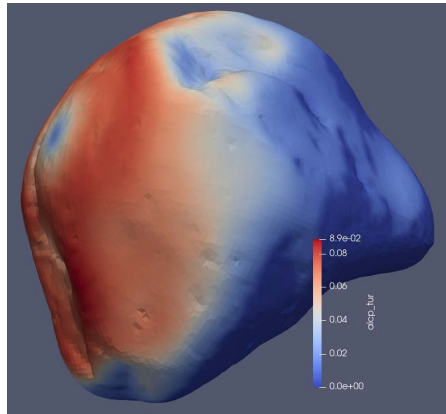


Рис. 5 — Распределение турбулентного коэффициента теплообмена по поверхности сложного метеороидного тела

На рисунке 6 представлена картина течения. Расчёт проводился в трёхмерной постановке, на поверхности модели поставлены граничные условия проскальзывания.

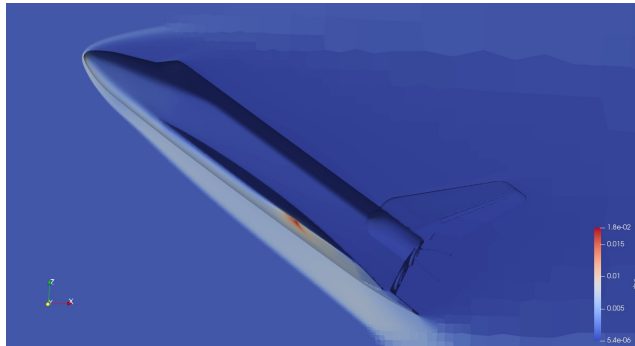


Рис. 6 — Картина течения для модели «Шаттла»

На рисунке 7 предоставлено сравнение результатов расчёта теплового потока модифицированным методом эффективной длины с экспериментальными данными. Значения приведены для линии оси симметрии модели с наветренной стороны.

В **третьей главе** приведено описание математического метода расчёта уноса и прогрева материала метеороидного тела в трёхмерной постановке.

В разделе 3.1 описан метод расчёта прогрева и изменения формы на подвижных сетках и представлена общая схема расчёта изменения формы. Входными параметрами расчёта является начальная форма, поле

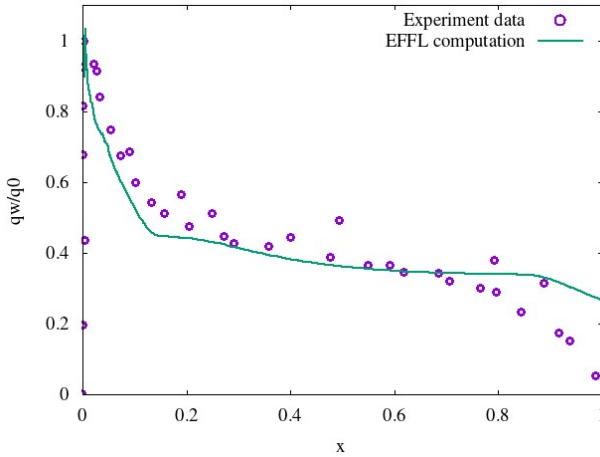


Рис. 7 — Сравнение результатов расчёта модифицированным методом эффективной длины с экспериментальными данными

температур, тепловой поток, модель разрушения поверхности материала, теплофизические свойства материала. Скорость движения поверхности в каждой точке определяется через расчёт баланса энергии на границе на каждой итерации вычислительного алгоритма. Учитываются следующие факторы: конвективный тепловой поток; энергия разрушения материала; лучистый поток с поверхности; тепловой поток, идущий на прогрев материала. Тепловой поток корректируется с учётом вдува в пограничный слой продуктов разрушения.

Раздел 3.2 посвящён описанию получения модели разрушения в равновесной постановке на примере горения углерода в воздухе. В модели учитывается три режима уноса — кинетический, диффузионный и сублимационный. Итерационный алгоритм расчёта скорости уноса на основе расчёта равновесной концентрации элементов у поверхности:

1) Задаются входные параметры, такие как давление P , температура поверхности T_w , состав, коэффициент теплообмена α/c_p , коэффициенты аккомодации α_{c_1} , α_{c_2} , α_{c_3} .

2) задаётся начальная скорость уноса \dot{m} .

3) по скорости уноса корректируется новый коэффициент теплообмена (α/c_p).

4) рассчитывается равновесная концентрация элементов у поверхности.

5) с учётом того, что концентрация продуктов на внешней границе пограничного слоя считается равной 0, рассчитывается скорость уноса в результате горения; рассчитывается скорость уноса в результате сублимации.

б) итоговое значение скорости в результате горения и сублимации сравнивается с начальным. При необходимости происходит его корректировка и расчёт повторяется до удовлетворительного совпадения результатов.

Схематично процесс изображён на рисунке 8.

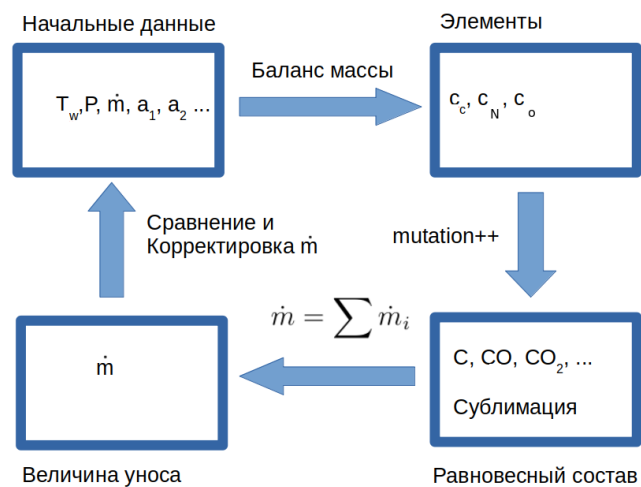


Рис. 8 — Схема расчета скорости уноса

Раздел 3.3 содержит описание программной реализации метода расчёта изменения формы в комплексе с расчётом конвективных тепловых нагрузок.

В разделе 3.4 приведены результаты валидации расчёта уноса с экспериментальными данными, полученными в плазматроне. Полная энтальпии потока в 27 Мдж/кг, тепловой поток к холодной стенке в критической точке 21 МВт/м², давление торможения в 76 кПа (0.75 атм). На рис. 9 представлено сравнение результатов расчёта величин уноса для двух точек на поверхности (красная линия) с экспериментальными данными (маркеры).

Раздел 3.5 содержит рекомендации по использованию постоянных, не зависящих от температуры теплофизических свойств графита для процессов уноса углеродной поверхности при высоких тепловых и силовых нагрузках.

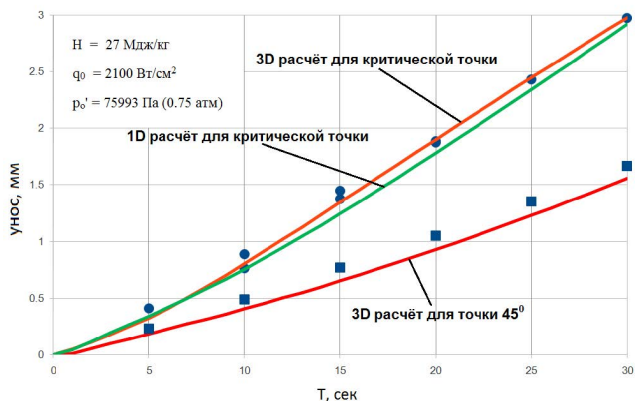


Рис. 9 — Сравнение распределения величины уноса в критической точке и в точке 45° модели для времени $t=30$ с экспериментальными данными

Четвёртая глава посвящена описанию архитектуры программного комплекса и принципов его работы и показан результат расчёта сильного уноса, получены стационарные метеоритные формы.

В процессе расчёта сильного уноса материала метеорита, то есть сильного изменения формы, поверхностная сетка формы метеорита сильно изменяется. Такое изменение влечёт за собой ухудшение качества расчётных ячеек сетки, что делает невозможным дальнейшее проведение расчёта. Выходом из такой ситуации видится перестроение сетки по получившимся обгарным формам метеорита. Перестроение расчётной сетки ведёт к дополнительным манипуляциям — собственно перестроению сетки в процессе движения по траектории и переносу (мапированию) полей температуры с предыдущего шага. Таким образом, цепочка расчёта усложняется. Для проведения подобных сценариев расчёта использовалось ядро программного комплекса, архитектура которого представлена в разделе 4.1.

Раздел 4.2 содержит верификацию расчёта сильного уноса, с сильным изменением формы.

Сравнение проводилось со стационарными метеоритными формами, то есть с формами, которые приобретают метеориты в результате своего движения в атмосфере. Расчёт внешнего обтекания проводился в осесимметричной постановке для экономии вычислительных ресурсов, расчёт прогрева и уноса — в трёхмерной. На высоте 20 км, метеоритное тело в форме шара радиусом 0.25 м движется со скоростью 2000 м/с. Плотность 7.874 г/см^3 , теплопроводность 80.4 Вт/(м·К) , теплоёмкость 0.449 кДж/(кг·К) , степень черноты 0.8. В расчетах использовалась простая модель горения железа: температура разрушения — 1500 К, эффективная энтальпия разрушения — 1 МДж/кг.

Расчётный сценарий был повторен 100 раз, на рисунке 10 представлена эволюция формы под действием турбулентных тепловых потоков.

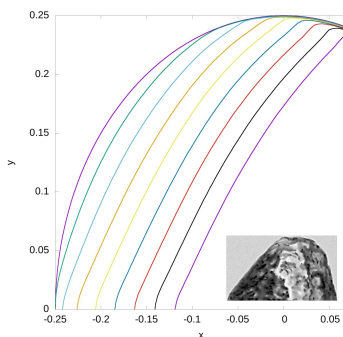


Рис. 10 — Эволюция образующей метеороидного тела

Сравнение результатов расчёта стационарной метеоритной формы с данными из работы В.Г. Воронкина, В.В. Лунёва, А.Н. Никулина приведены на рисунке 11 и показывают хорошее согласие между собой, что позволяет утверждать о корректном расчёте изменения формы метеорита при сильном уносе.

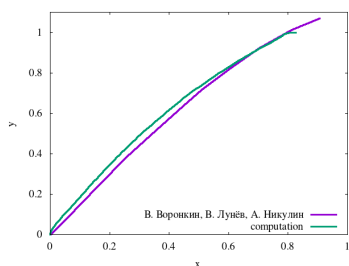


Рис. 11 — Сравнение стационарной метеоритной формы при скорости движения $M=6$, идеальный газ

На рисунке 12 представлена картина течения в разные моменты времени, на поверхности метеороидного тела показана температура. На рисунке виден устойчивый расчёт движения угловой точки на поверхности.

Пятая глава посвящена описанию расчёта разрушения материала метеороидного тела и изменения формы метеорита при движении в атмосфере в трёхмерной постановке в составе вычислительного комплекса.

В раздел 5.1 изложена задача о расчёте сложного метеороидного тела в трёхмерной постановке.

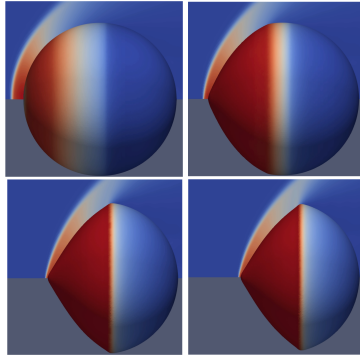


Рис. 12 — Картина течения и форма метеороидного тела в процессе расчёта

В разделе 5.2 описан сценарий расчёта и приведены результаты моделирования. На рисунке 13 представлено поле температур и изменение формы тела в разные моменты времени.

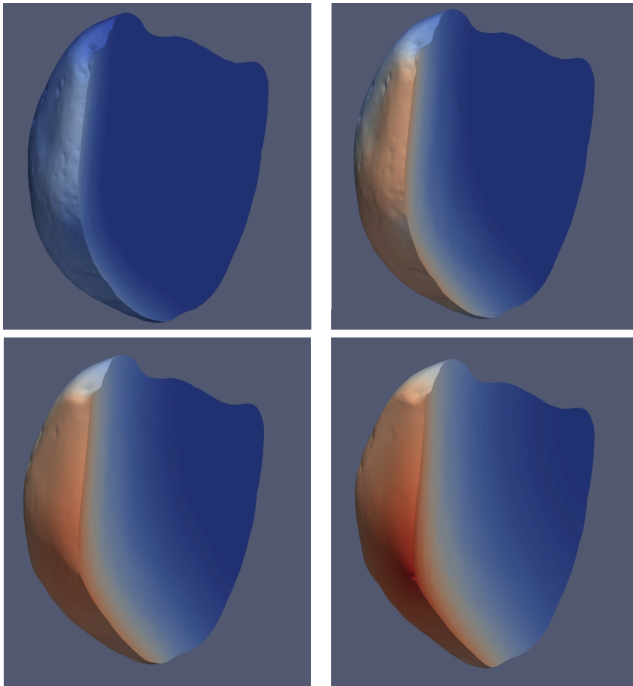


Рис. 13 — Изменение формы метеороидного тела в процессе расчёта

В заключении приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1) разработан математический метод расчёта тепловых потоков на основе модификации метода эффективной длины;

2) показана возможность оценки тепловых потоков на телах сложной формы - с впадинами и выбоинами;

3) на языке программирования C++ проведена программная реализация метода расчёта тепловых потоков;

4) разработан вычислительный метод расчёта прогрева и уноса материала метеороидного тела в трёхмерной постановке на основе несопряжённого подхода, когда задача расчёта аэродинамического нагрева решается отдельно от задачи расчёта уноса и прогрева материала на поверхности метеорита;

5) показана возможность расчёта прогрева и уноса двумя способами:
- с использованием оценки тепловых потоков, предложенным в работе математическим методом на основе модификации метода эффективной длины;

- с помощью расчёта тепловых потоков через решение уравнений Навье-Стокса;

6) приведен алгоритм расчёта механизма уноса углеродного материала в воздухе в равновесной постановке с использованием открытых библиотек mutation++;

7) реализованы разработанные модели и методы в проблемно-ориентированном комплексе параллельных программ, предназначенном для определения аэродинамического нагрева, расчёта изменения формы на основе суперкомпьютерного моделирования;

8) проведен расчёт изменения формы сложного метеороидного тела в трёхмерной постановке и прогревом его материала для режима, где определяющим влиянием является аэродинамический нагрев: характерный размер метеорита 0.25 м, скорость движения 2000 м/с, высота 20 км.

Публикации.

По теме диссертации были опубликованы следующие работы:

1. Минюшкин Д. Н. Расчет эволюции уносимой теплозащиты методом поверхностей уровня //Физико-химическая кинетика в газовой динамике. — 2016. — Т. 17. — №. 4. — С. 10 — 10.

2. Минюшкин Д. Н. Трёхмерный расчёт прогрева и уноса теплозащитного материала с использованием платформы OpenFOAM и неструктурированной сетки //Космонавтика и ракетостроение. — 2018. — №. 5. — С. 101 — 111.

3. Минюшкин Д. Н., Крюков И. А. Расчет прогрева и уноса теплозащитного материала в осесимметричной постановке //Теплофизика высоких температур. — 2020. — Т. 58. — №. 2. — С. 244-248.

4. Minyushkin D. N., Kryukov I. A. Calculation of aerodynamic heating and ablation of thermal protection system in axisymmetric formulation //AIP Conference Proceedings. — AIP Publishing LLC, 2019. — Т. 2181. — №. 1. — С. 020025.

Минюшкин Дмитрий Николаевич

Математическое моделирование изменения формы метеороидного тела при
аэродинамическом нагреве

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____