

## ОТЗЫВ

**официального оппонента кандидата физико-математических наук  
Лаптева Игоря Вячеславовича  
на диссертационную работу Минюшкина Дмитрия Николаевича  
«Математическое моделирование изменения формы  
метеороидного тела при аэродинамическом нагреве», представленную  
на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.1.9 - «Механика жидкостей, газа и плазмы»**

Исследования процесса нагрева, уноса вещества и разрушения метеоритов, движущихся в атмосфере Земли, имеют довольно давнюю историю, однако остаются **актуальными**, и по сей день.

Сложность этих исследований обусловлена тем, что, во-первых, практически никогда не известна точная форма метеорита (по крайней мере, на малых и средних масштабах), кроме того, в процессе полета происходит ее изменение, что влечет изменение аэродинамических характеристик метеорита; во-вторых, не всегда известно вещество, из которого этот метеорит состоит и свойства его поверхности (пористость, шероховатость, степень оплавленности, вдув в пограничный слой продуктов горения и т.д.). В связи с этим чрезвычайно сложно решать аэро-термодинамическую задачу вместе с одновременным решением вопросов термического и механического разрушения метеорита. В частности, незнание свойств и формы поверхности не дает возможность корректно поставить граничные условия при решении уравнений Навье-Стокса. Эта неопределенность в задании граничных условий может существенно ухудшить качество вычислительного процесса, при том, что сам вычислительный метод может быть достаточно точный. Вышесказанное в еще большей степени касается использования сопряженных методов решения задач. В них вычислительная ошибка от

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

« 6 » 06 2023

неправильного задания граничных и начальных условий может нарастать на каждом шаге вычислений.

В таких случаях применение полуинженерных методов и, в частности, метода эффективной длины, могут не только упростить решение задачи, но, зачастую, дать результаты, которые, в условиях дефицита информации, будут не хуже результатов, получаемых более сложными вычислительными методами.

В работе Минюшкина Д.Н. рассматривается новый метод расчёта прогрева и уноса поверхности метеорита в результате аэродинамического нагрева при движении по заданной 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.

Автором разработан программный комплекс, в котором реализован вычислительный метод расчёта прогрева и уноса в трёхмерной постановке, что позволяет за относительно небольшое время оценить изменение формы метеорита в результате аэродинамического нагрева при движении в атмосфере. В этом состоит **научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы**. В качестве **практической значимости** работы можно также упомянуть возможность использования разрабатываемых автором диссертации методов для получения оценочных решений задач аэро- термодинамики для изделий ракетно-космической техники.

Работа состоит из Введения, пяти глав, заключения и приложения.

**Во Введении** обосновывается актуальность темы, формулируется цель исследования, кратко излагается содержание глав диссертации.

**Первая глава** посвящена обзору состояния исследования в области моделирования уноса материалов метеороидных тел. Рассматриваются особенности различных вычислительных кодов, используемых для расчета прогрева и уноса материалов.

**Вторая глава** посвящена построению модифицированного метода эффективной длины. Метод является несопряженным. В нем сначала рассчитываются силовые нагрузки, а затем тепловые. Сформулированы требования по устойчивости к расчетному методу. Отмечено, что расчет методом эффективной длины должен давать результат на теплонапряженных участках и оставаться устойчивым в местах, где он не дает корректного результата. Исходя из этого принципа, строится вычислительный алгоритм, в соответствии с которым выделяются критические области; вычисляются в них значения основных теплофизических величин; производится вычисление эффективного радиуса тела в каждой ячейке и, наконец, находится решение задачи вдоль линии тока.

Во второй главе также приведены результаты валидации расчёта тепловых нагрузок на основе данных по обтеканию сферы и обтеканию цилиндра с различными радиусами закругленной кромки. А также приведены результаты расчета обтекания тел сложной геометрии (тела, имеющего форму типа картофелины, и модели Шаттла), в которых присутствуют точки растекания, впадины, выщерблены, выпуклости и т.п.

В **третьей главе** описан метод расчёта уноса материала при незначительном изменении формы тела. Расчёт прогрева конструкции с уносом материала с учетом конвективного и лучистого потоков тепла проводится на подвижных сетках. Показано удовлетворительное совпадение результатов расчёта с экспериментальными данными. В осесимметричной постановке проведён расчёт с использованием решения уравнений Навье-Стокса.

В четвертой главе приведено описание вычислительного ядра, позволяющего проводить сложные комплексные расчёты с использованием различных решателей, конвертеров и вспомогательных программ. Показана работа расчётной цепочки, состоящей из нескольких решателей.

Пятая глава посвящена решению задачи о расчёте изменения формы метеоритного тела в трёхмерной постановке с прогревом материала. Показана способность подхода, изложенного в данной работе, проводить расчёты уноса материала метеорита сложной геометрии в трёхмерной постановке с прогревом его материала.

Необходимо еще раз подчеркнуть, что расчёты в диссертационной работе проводились с помощью разработанного авторского программного комплекса.

По теме диссертации опубликованы 4 статьи, из них 3 статьи в журналах из списка, одобренного ВАК. Работа прошла апробацию – докладывалась на конференциях, в том числе и международных.

Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

Вместе с тем, по работе можно сделать некоторые замечания:

1. Подавляющее большинство метеоритов представляют собой каменные тела, поэтому математическая модель уноса материала метеорита должны описывать разрушение силикатов. Представленные в диссертации модели валидируются, в основном, на задачах по уносу графита и некоторых композитных материалов.
2. При моделировании аэродинамики, прогрева и уноса материала метеорита сложной формы не учитываются аэродинамические моменты, действующие на метеорит и приводящие, в общем случае, к изменению его ориентации по направлению к движению, что может приводить к смещению точек натекания и изменению тепловых нагрузок.

3. В работе не раскрыта область применения метода эффективной длины, не приведены оценки точности моделирования отрывных зон, донных эффектов и их влияния на тепловой режим и унос материала метерорита.

4. На стр. 35 вместо выражения для  $z_{\text{reff}}$  записана формула (2.27) для  $r_{\text{eff}}$ .

5. В диссертации имеются грамматические опечатки.

Отмеченные недостатки не снижают общей положительной оценки работы.

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям ВАК, в том числе, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней №842 от 24.09.2013 г., а ее автор Минюшкин Дмитрий Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 - «Механика жидкостей, газа и плазмы».

Кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории Акционерного общества «Государственный научный центр Российской Федерации «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша»

30 мая 2023 г.

И.В. Лаптев

Почтовый адрес: ул. Онежская, д. 8, г. Москва, Россия, 125438

Контактный телефон: +7 (495) 453-92-44 (доб. 4-61)

Адрес электронной почты: laptev@kerc.msk.ru

Подпись к.ф.-м.н. Лаптева И.В. удостоверяю:

Ученый секретарь АО ГНЦ «Центр Келдыша»

30 мая 2023 г.



Ю.Л. Смирнов

с отзывом означенным

06.06.2023

Минюшкин Д.И.