



Акционерное общество
**«Военно-промышленная корпорация
«НПО машиностроения»**
(АО «ВПК «НПО машиностроения»)

ул. Гагарина, д. 33,
г. Реутов, Московская область, Россия, 143966
Тел.: +7 (495) 528-30-18, факс: +7 (495) 302-20-01;
E-mail: vpk@vpk.npomash.ru, www.npomash.ru
ОКПО 07501739 ОГРН 1075012001492
ИНН/КПП 5012039795/504101001

№ _____

на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель Генерального
директора – заместитель Генерального
конструктора АО «ВПК «НПО
машиностроения», генеральный
конструктор оперативно-тактического
вооружения ВМФ, доктор технических
наук



А.А. Дергачёв

13.06.2023 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации Акционерного общества «Военно-промышленная корпорация «Научно-производственное объединение машиностроения» на диссертационную работу Минюшкина Дмитрия Николаевича на тему «Математическое моделирование изменения формы метеороидного тела при аэродинамическом нагреве», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертационная работа Минюшкина Д.Н. посвящена разработке метода численного моделирования разрушения метеороидных тел в условиях аэродинамического нагрева, включающего в себя эффективные для практического использования методы трехмерного расчета тепловых нагрузок, приходящихся на поверхность метеороидного тела, ее прогрева и уноса, а также реализации разработанного метода в виде программного комплекса.

Актуальность темы. Степень точности оценки формы и аэродинамических характеристик метеороидных тел в процессе их движения в атмосфере имеет весьма важное значение для определения зоны их падения на поверхность Земли. При этом метеороидные тела имеют неправильную форму, претерпевающую значительные изменения в результате разрушения материала под действием интенсивных тепловых и силовых нагрузок. Экспериментальное исследование подобных процессов на наземных стендах не позволяет охватить все разнообразие режимов движения метеороидных тел в атмосфере, а летные испытания оказываются чрезмерно затратными и также не лишены ряда серьезных ограничений.

Отдел документационного
обеспечения МАИ
«14» 06 2023.

В этой связи исследования, направленные на определение аэродинамических характеристик и параметров аэродинамического нагрева тел неправильной формы, а также на воспроизведение процесса разрушения материала метеороидных тел, опирающиеся на методы численного моделирования, приобретают первостепенное значение. Понятно, что и при таком подходе расчет даже одной прогнозируемой траектории движения метеороидного тела требует существенных затрат ресурсов. Таким образом, разработка практически эффективных методов численного моделирования является весьма актуальной.

В настоящее время уже имеются компьютерные коды, реализующие те или иные математические модели разрушения материалов под действием силовых и тепловых нагрузок. Вообще говоря, оценки этих нагрузок могут быть выполнены и выполняются на основе численного решения уравнений Навье – Стокса. В то же время, для тех же целей могут быть применены и намного более эффективные для практической реализации инженерные методы расчета, основанные, например, на методе эффективной длины В.С. Авдуевского. Кроме того, при расчете разрушения материала необходим учет целого ряда физических механизмов, сопровождающих этот процесс, таких как дробление, унос материала, его оплавление, горение, а также эффективный способ моделирования изменения формы метеороидного тела в результате процессов разрушения.

В работе Минюшкина Д.Н. применен новый метод численного моделирования прогрева и уноса материала метеороидного тела, опирающийся на несопряженный подход расчета аэродинамического нагрева метеороидного тела на основе модифицированного метода эффективной длины и решения вспомогательной трехмерной задачи деформирования твердого тела. Предложенный подход обеспечил не только практическую эффективность метода численного моделирования, но и его вычислительную устойчивость. Также Минюшкиным Д.Н. был создан авторский программный комплекс, в котором разработанный автором метод расчета реализован на языке программирования C++. В этом состоит **научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Практическая значимость работы** состоит также и в том, что разработанные автором диссертации методы могут быть использованы для решения задач, связанных с расчетом аэродинамического нагрева изделий ракетно-космической техники.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и приложения. **Во введении** диссертации в краткой форме освещена основная проблематика прогнозирования движения в атмосфере метеороидных тел. На основе литературного обзора, представленного в первой главе, изложены цель работы, задачи диссертационного исследования, показаны практическая значимость, научная новизна, а также обоснована достоверность полученных результатов.

В первой главе приведен обзор литературы по состоянию исследований в области моделирования уноса материала метеороидных тел.

Представлено описание основных механизмов разрушения материалов в условиях интенсивного нагрева и значительного силового воздействия. Рассмотрены основные подходы к расчету процессов аэродинамического нагрева, разрушения и уноса материала метеороидных тел. Автор представил обзор основных работ по экспериментальному исследованию уноса материалов и определению разнообразных данных, необходимых для численного моделирования этого процесса, а также привел краткий обзор наиболее удачных современных программных комплексов, привлекаемых для решения задач прогрева, разрушения и уноса материалов. На основе проведенных обзоров сформулированы цели и задачи исследования.

Вторая глава содержит описание модифицированного метода эффективной длины. Данный метод предполагает предварительное получение поля невязкого обтекания тела. С этой целью автор применил решатель с открытым кодом rhoCentralFoam, который модифицировал в части добавления искусственной вязкости. При применении метода эффективной длины тепловой поток к поверхности тела определяется локальными значениями параметров газа на внешней границе пограничного слоя и толщиной пограничного слоя, при этом локальная толщина пограничного слоя определяется предысторией формирования течения, начиная от точки растекания. Коэффициент теплообмена рассчитывается интегрированием вдоль линий тока, один из возможных способов вычислений подробно описывается в работе. Главной областью приложения результатов расчета методом эффективной длины являются наиболее теплонапряженные зоны в области точки растекания или же присоединения ударных волн. В областях разрушения пограничного слоя, где метод эффективной длины неприменим, от расчетного алгоритма, предлагаемого автором, требуется лишь устойчивость вычислений. Предложенный автором подход подтвержден валидационными тестами определения ламинарного и турбулентного теплового потока на сфере и ламинарного теплового потока при обтекании торца цилиндра со скругленными кромками. Для демонстрации устойчивой работы метода приведены результаты расчета ламинарного и турбулентного потока на метеороидном теле и на модели типа «Шаттл».

Третья глава содержит ряд результатов, относящихся к расчету уноса материала тела в трехмерной постановке в предположении, что форма тела при этом претерпевает незначительные изменения. Результаты расчетов удовлетворительным образом согласуются с экспериментальными данными, что служит подтверждением корректности расчета скорости уноса материала с поверхности тела.

В четвертой главе диссертации представлена стратегия организации работы ядра программного комплекса, обеспечивающего эффективное взаимодействие различных решателей, средств перестройки расчетных сеток, переноса данных с одной сетки на другую и других расчетных модулей. Эффективность такой организации работы программного комплекса демонстрируется в расчете стационарных метеоритных форм в условиях

сильного уноса материала. Результаты расчета находятся в удовлетворительном согласии с ранее опубликованными данными.

Пятая глава демонстрирует способности метода, разработанного автором, и созданного на основе этого метода авторского программного комплекса осуществлять трехмерное численное моделирование уноса материала метеороидного тела сложной формы в условиях интенсивного аэродинамического нагрева. С этой целью было выполнено комплексное численное моделирование разрушения материала и изменения формы метеороидного тела, начальная поверхность которого содержала многочисленные неровности в виде бугров, впадин, выбоин и т.п.

В заключении диссертации отражены основные результаты работы.

По содержанию исследования имеются следующие замечания:

1. В начале главы 1 указывается, что в разработанном автором методе расчета разрушения материала метеороидных тел учитывается только влияние конвективного теплообмена. В связи с этим следовало бы хоть как-то охарактеризовать, в какой степени данное предположение сужает практические приложения работы.
2. Выводы по главе 4 содержат недоработанный текст.
3. Начало (первые два абзаца) раздела 4.1 полностью повторяют фрагмент текста введения к этой главе на стр.73.
4. В последнем абзаце стр. 12 фраза *«моделирование ламинарно-турбулентного перехода изменение формы летательного аппарата»* должна относиться по смыслу к изменению формы метеороидного тела. Вообще, текст диссертации содержит весьма значительное количество падежных несоответствий, пропусков дефисов и других знаков препинания, хотя в целом работа написана хорошим грамотным языком.

Сделанные замечания не носят принципиального характера и не умаляют достижений автора.

Результаты работы Минюшкина Д.Н. достаточно полно отражены в публикациях в научных изданиях. Используемые в работе методы обоснованы и соответствуют целям решаемых задач. Автореферат соответствует содержанию текста диссертации.

Диссертация и отзыв рассмотрены и одобрены на заседании секции №2 научно-технического совета АО «ВПК «НПО машиностроения», протокол №173 от 09.06.2023.

Рассмотренная диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, соответствующую всем критериям ВАК, в том числе установленным п.9 Положения о порядке присуждения ученых степеней №842 от 24.09.2013г., и заслуживает положительной оценки, а её автор, Минюшкин Дмитрий Николаевич, заслуживает присвоения ученой

степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Главный специалист
АО «ВПК «НПО машиностроения»,
доктор технических наук



Котенев Владимир
Пантелеевич

Ведущий научный сотрудник
АО «ВПК «НПО машиностроения»,
кандидат физ.-мат. наук



Плюснин Андрей
Владимирович

Ученый секретарь секции НТС,
кандидат физ.-мат. наук



Бондаренко Леонид
Александрович

Акционерное общество «Военно-промышленная корпорация «Научно-производственное объединение машиностроения»

Адрес: 143966, Россия, Московская обл., г. Реутов, ул. Гагарина, д. 33

Тел.: +7 (495) 528-74-50, факс: +7 (495) 302-20-01

E-mail: vpk@vpk.npomash.ru

Веб-сайт: <http://www.npomash.ru>

С отзывом ознакомлен

14.06.2023

