

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета на диссертацию Косаревой Алены Александровны на тему: «Неравновесные течения смесей, содержащих молекулы углекислого газа, за ударными волнами», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа А.А. Косаревой содержит совокупность научно-исследовательских результатов, связанных с разработкой современных средств математического моделирования сложных процессов, протекающих при входе космических аппаратов в атмосферу планет, и описанием течений около спускаемых аппаратов. За ударной волной, образующейся около космического аппарата при его входе в атмосферу планет, газ разогревается до больших температур, вследствие чего происходит возбуждение внутренних степеней свободы, энергообмен между различными молекулами, диссоциация, ионизация, излучение, поглощение. Необходимость создания физико-математических моделей и реализующих их средств численного моделирования, а также требования практики, связанные с повышением точности численных прогнозов высокотемпературных многокомпонентных течений газовых смесей, и трудности использования лабораторного эксперимента, определяют **актуальность темы** диссертационной работы.

Создание новых математических моделей, их всесторонняя верификация на основе решения широкого круга задач, связанных с исследованием течений около спускаемых аппаратов, применение разработанных средств численного моделирования для решения практических задач определяют **научную новизну** диссертационной работы А.А. Косаревой. В работе проводится сравнение различных моделей для описания колебательной кинетики и химических реакций в рассматриваемых смесях. Даются оценки эффектам начальной колебательной неравновесности в пространственно-

однородной смеси, а также влиянию колебательного возбуждения молекул углекислого газа в набегающем потоке на параметры течения за фронтом ударной волны.

Хорошее согласование результатов численного моделирования, полученных по многотемпературным моделям, с экспериментальными данными определяет **достоверность полученных результатов**. Сравнение величин отхода ударной волны показывает важную роль химических реакций в корректном определении характеристик потока и расположения ударной волны. Достоверность результатов обеспечивается использованием неравновесных распределений и моделей столкновительных процессов, строго обоснованных в кинетической теории газов и подтвержденных экспериментально.

**Практическая значимость** диссертационной работы обуславливается, в том числе, созданием программного кода, позволяющего рассчитывать задачи пространственно-однородной релаксации смесей и течения за ударными волнами. Полученные результаты могут быть использованы для повышения точности расчетов течений, а также для определения доминирующих процессов в различных начальных условиях. Многотемпературные модели реализованы в рамках программного пакета ANSYS Fluent, что позволяет рассчитывать неравновесные двумерные и трехмерные течения реальной геометрии с использованием уточненных моделей кинетической теории. Проведенное исследование и представленные оценки могут быть полезными при выборе моделей химических реакций при решении конкретных прикладных задач (моделирование процессов в химических реакторах, в потоках сжатия и расширения смесей, содержащих молекулы углекислого газа.).

Представленные материалы основаны на глубоком и обширном авторском исследовании, а в работе дается их всестороннее обсуждение. По полученным результатам численного моделирования делаются обоснованные и значимые выводы. Материалы и стиль изложения, использованные модели и подходы, сформулированные выводы и обобщения говорят о глубокой эрудиции и высокой квалификации автора. Анализ публикаций автора позволяет сделать заключение о том, что основные результаты его исследования в полной мере опубликованы в рецензируемых изданиях.

Диссертационная работа выполнена на актуальную тему, научные положения, выносимые на защиту, выводы и рекомендации в должной степени обоснованы, их достоверность подтверждена тестовыми исследованиями, сравнением с экспериментальными данными из различных источников и результатами, полученными другими исследователями. Работа имеет высокий уровень научной новизны и практическую значимость.

По диссертации имеются следующие замечания и пожелания.

1. Представляется целесообразной формулировка общей математической модели, пригодной для описания многокомпонентных газовых смесей в многотемпературном приближении с учетом вязкости. Формулировка математической модели только для CO<sub>2</sub> несколько снижает ценность представленной информации, а также затрудняет обобщение модели на другие смеси. Также формулировка модели дается по отдельности для течений без и с учетом вязкости. При этом уравнения неразрывности, сохранения количества движения и энергии не зависят от используемой модели химической кинетики, имея универсальный вид. В этой связи, было бы целесообразным разделить основную систему уравнений на две подсистемы, описывающую газодинамические процессы и химические процессы.

2. Некоторые рисунки представляются перегруженными информацией (на некоторых рисунках приводится до 10 линий, соответствующих различным условиям). Такие рисунки следовало бы разбить на несколько, уменьшив количество линий на каждом из них.

3. Обращает на себя внимание, что список литературы, состоящий из 89 наименований, содержит всего 20 отечественных публикаций (в некоторых случаях автор предпочитает оперировать публикациями в переводных версиях русскоязычных журналов). Многие работы из списка литературы были опубликованы 5 и более лет назад. В списке литературы всего несколько публикаций за последние 3-5 лет (причем многие из этих работ были опубликованы соискателем). В этой связи возникает вопрос, связано ли это с падением интереса к теме, рассмотренной в диссертационной работе, или с какими-то другими обстоятельствами, не оговоренными в тексте работы.

Сделанные замечания не влияют на качество диссертационной работы и ее высокую оценку и лишь подчеркивают интерес к разработанным средствам численного моделирования высокотемпературных и многокомпонентных течений, а также к полученным результатам.

Диссертация Косаревой Алены Александровны тему: «Неравновесные течения смесей, содержащих молекулы углекислого газа, за ударными волнами» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 01.09.2016 № 6821/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Косарева Алена Александровна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости,

газа и плазмы. Пункт 11 указанного Порядка диссертантом не нарушен.

Член диссертационного совета

Доктор физико-математических наук



Волков К.Н.

20 мая 2021