

Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт автоматизации
проектирования Российской
академии наук
(ИАП РАН)

123056, Москва, ул. 2-я Брестская, д.19/18
Телефон: (499)250-02-62
Факс: (499)250-89-28
E-Mail: icad@icad.org.ru

от _____ № _____
на № _____ от _____ г.

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки «Институт
автоматизации проектирования
Российской академии наук» (ИАП РАН)



И.С. Никитин

03 _____ 2022 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт автоматизации проектирования Российской академии наук» (ИАП РАН) по диссертации Кононова Дмитрия Сергеевича на тему «Численное моделирование высокоскоростных течений с ударными и детонационными волнами в каналах», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертация Кононова Дмитрия Сергеевича посвящена созданию и усовершенствованию физико-математических и вычислительных моделей в области исследования процессов детонационного горения в высокоскоростных газодинамических течениях и разработке вычислительных алгоритмов и компьютерных программ, направленных на решение прикладных задач.

Задача разработки математических моделей и вычислительных алгоритмов для моделирования химически-реагирующих течений в каналах с наличием ударных и детонационных волн в настоящее время имеет большой научный и практический интерес. Он объясняется исследованиями в области создания перспективных энергетических установок, рабочий цикл которых основывается на процессах горения и детонации, задачами обеспечения взрывобезопасности и др. Принимая во внимание объем вычислений, необходимый для расчета многомерных течений с физико-химическими превращениями, не теряет актуальность задача проведения экспресс-расчетов для оценки значений параметров течения. Таким образом, направление исследования данной диссертационной работы, выбранной соискателем, представляет значительный научный интерес и практическую значимость.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации 163 страницы, включая 67 рисунков и 20 таблиц. Список литературы содержит 127 наименований.

И.С. Никитин

05 04 2022

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, приводится научная новизна и практическая значимость результатов. Изложены основные положения, выносимые на защиту, представлены обзор литературы, список публикаций автора и сведения об апробации работы.

В **первой главе** освещается подход к моделированию течений с физико-химическими процессами с моделями термодинамики и химической кинетики. Описаны основные применяемые численные методы. Приведены результаты тестирования реализованных алгоритмов на классических тестовых задачах механики жидкости и газа. В рассмотренных задачах в частности показана эффективность разработанных вычислительных алгоритмов при переходе рассматриваемой системы от химически неравновесного состояния к равновесному.

Во **второй главе** приводятся результаты численного моделирования одномерного стационарного химически реагирующего течения в канале переменного сечения, заканчивающегося соплом Лавала, с наличием детонационной волны. На входе в канал течение полагается сверхзвуковым, до детонационной волны течение считается замороженным, за детонационной волной – равновесным. Описана методика термодинамического анализа течения, получены распределения параметров в канале со стационарной детонационной волной. Получена и проанализирована в виде RR-диаграммы зависимость положения стационарной детонационной волны в канале в зависимости от соотношения площадей входного, минимального и выходного сечений. Сделан вывод о возможности существования в рамках одномерной теории стационарных детонационных волн при различных значениях скорости потока во входном сечении канала.

В **третьей главе** исследуется с использованием метода установления вопрос наличия устойчивых стационарных течений в канале переменного сечения, с двумя сужающимися и одной расширяющейся областями, заканчивающегося соплом Лавала, с детонационной волной в области до- минимального сечения. В качестве начального распределения параметров используются значения, полученные по методике, описанной в главе 2. Из результатов численного моделирования следует, что устойчивым является решение, полученное при наличии детонационной волны в расширяющейся области. Решения, полученные с детонационной волной в сужающихся областях, является неустойчивыми. Предложен и реализован конечно-разностный алгоритм, позволяющий в одномерной стационарной постановке решить прямую задачу теории сопла с прохождением особой точки для химически реагирующего течения с детонационной волной в области до- минимального сечения. Представлены результаты сравнения решений, полученных методом установления и прямой задачи теории сопла.

В **четвертой главе** рассматриваются одномерное и двумерное нестационарные течения в ударной трубе, заполненной горючей смесью, после отражения ударной волны от закрытого торца. Приводится решение задачи о "равновесной отраженной ударной волне" в многокомпонентной горючей газовой смеси в предположении, что перед отраженной ударной волной состав смеси остается неизменным, а за ней считается химически равновесным. В качестве реагирующей смеси рассматривается метано-воздушная смесь, химические превращения в которой моделируются с использованием сокращенного кинетического

механизма. Предложена термодинамически корректная форма записи брутто-реакции горения метана. Получено, что после отражения в зависимости от величины числа Маха падающей ударной волны наблюдаются устойчивые ($M \geq 4$) и неустойчивые ($M < 4$) режимы течения. Показано, что в результате отражения по горючей смеси распространяется детонационная волна в пересжатом режиме или в режиме Чепмена-Жуге. Показано, что в обоих случаях доминирующие значения параметров, полученные за отраженной ударной волной (в одномерной и двумерной нестационарной постановках), соответствуют решению задачи о "равновесной отраженной ударной волне".

В **заключении** формулируются основные результаты диссертации в соответствии с поставленными в диссертации задачами, обладающие научной и технической новизной и выносимые на защиту.

Работа в области исследований соответствует специальности 01.02.05 "Механика жидкости газа и плазмы" по пунктам:

п.4 Течения сжимаемых сред и ударные волны.

п.8 Физико-химическая гидромеханика (течения с химическими реакциями, горением, детонацией, фазовыми переходами, при наличии излучения и др.).

п.15 Тепломассоперенос в газах и жидкостях.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- решена задача прохождения особой точки в канале переменного сечения со сверхзвуковым потоком на входе и выходе в квазиодномерной стационарной при наличии ударной (детонационной) волны с многокомпонентными химическими превращениями;
- для химически реагирующего течения газа в канале переменного сечения со сверхзвуковым потоком на входе и выходе в квазиодномерной нестационарной постановке получены и проанализированы устойчивые режимы течения при наличии ударной (детонационной) волны в первой сужающейся области;
- получено численное решение задачи о распространении пересжатой детонационной волны в канале после отражения от закрытого торца. Доминирующее распределение параметров за ней может быть получено путем решения задачи об отраженной ударной волне, за которой выполняется условие достижения термодинамически равновесного состояния системы.

Практическая значимость работы заключается в разработке программного комплекса и алгоритмов, которые могут быть применены для экспресс-анализа химически-реагирующих течений с детальными и упрощенными химическими механизмами. Используемые методики позволяют моделировать тонкую структуру химически реагирующих течений от этапа инициирования реакций до установления значений параметров, соответствующих термодинамически равновесному состоянию системы. Разработанные алгоритмы и подходы могут быть использованы и внедрены в сторонние программные комплексы.

Достоверность результатов диссертации проверена при помощи проведения тестирования путем сопоставления с результатами экспериментальных работ по горению и

детонации, сравнения с численными результатами других авторов и результатами теоретических исследований.

Публикации, апробация результатов работы и личное участие автора в получении результатов диссертации.

Результаты научных исследований Кононова Д.С., выполненных в рамках диссертационной работы, обсуждались на большом числе научных конференций, им опубликовано 16 работ (три работы без соавторов и тринадцать в соавторстве с научным руководителем), в том числе 4 статьи в периодических изданиях, включенных в перечень ВАК или в международные реферативные базы данных Scopus и Web of Science.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Результаты диссертационной работы предлагается использовать в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах в авиационно-космической промышленности.

По диссертации имеются следующие вопросы и **замечания**:

1. При рассмотрении течения горючей смеси в ударной трубе вязкие эффекты не учитываются. Формирующиеся на стенках пограничные слои могут сильно изменить характер течения за ударной волной. Данный факт снижает ценность полученных результатов.
2. Сделанные выводы о стабилизации детонационной волны в канале, основанные на одномерной теории, имеют чисто теоретическое значение ввиду существенно многомерного характера течения с ударными и детонационными волнами в реальных энергетических установках.
3. На стр. 39-40 приведены зависимости концентраций от времени. Подобные графики качественно соответствуют результатам многих нульмерных расчетов для других смесей. Было бы желательно привести сравнение с какими-то расчетами из других статей для количественных сравнений с приведенными результатами.
4. На стр. 44 приведены результаты расчетов задачи Сода. Профили содержат участки с немонотонностями в районе ударной волны. В работе использовался метод Годунова для интегрирования уравнений и метод HLL для расчета потоков через грани ячеек. Подобные схемы, как правило, являются монотонными. Например, в книге Toro E.F. Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics. Third Edition на стр 339 приведены профили для схемы HLL. Там нет никаких немонотонных участков. Желательно объяснить полученные вычислительные эффекты.
5. В работе много повторов одних и тех же систем уравнений и соотношений, что приводит к неоправданному увеличению объема текста. Например, соотношения Ренкина-Гюгонно приводятся на стр. 23, 49, 93, 108, 109, 110, 115.

Сделанные замечания не снижают актуальность и значимость полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку работы. Несмотря на имеющиеся замечания.

работа выполнена на высоком физико-математическом уровне, а проведенные в работе исследования являются научно-обоснованными и имеют практическую значимость в области вычислительной физической газовой динамики. Диссертация представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям, предъявляемым ВАК России к кандидатским диссертациям по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы, а её автор, Кононов Дмитрий Сергеевич, заслуживает присуждения ему искомой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв на диссертацию обсужден и одобрен на семинаре отдела вычислительных методов и турбулентности, протокол № 1/03 от «29» марта 2022 года.

С.н.с., к.ф.-м.н.



Лопато А.И.

Г.н.с., д.ф.-м.н.



Никитин И.С.

С отзывом ознакомлен 05.04.22 