

Отзыв официального оппонента  
на диссертационную работу Кононова Дмитрия Сергеевича  
«Численное моделирование высокоскоростных течений с ударными  
и детонационными волнами в каналах», представленную на соискание  
ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности  
01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

*Актуальность темы и практическая значимость.* Представленная к защите диссертационная работа посвящена расчетно-теоретическому исследованию процессов детонационного горения в химически реагирующих высокоскоростных течениях. В работе численно интегрируется система уравнений газовой динамики, дополненная термическим и калорическим уравнениями состояния для смеси совершенных газов и дифференциальными уравнениями химической кинетики. С применением детальных и упрощенных кинетических механизмов исследуются процессы распространения, стабилизации и устойчивости детонационных и ударных волн в каналах переменного сечения. В качестве основных численных методов исследования используются метод Годунова и конечно-разностный подход.

Выбранная тема исследований в настоящий момент является достаточно актуальной как с теоретической, так и с практической точек зрения. Процессы, протекающие в реагирующих смесях и сопровождающиеся детонационным горением, являются достаточно сложными, имеют различные масштабы и много факторов, что необходимо учитывать для корректного описания физических явлений. Физико-математическая и вычислительные модели, описывающие явление детонации во всей его полноте в настоящее время еще не созданы. Актуальность исследований обусловлена как возможностью использования детонационного горения в разрабатываемых разноцелевых перспективных энергетических установках, так и желанием недопущения процессов инициирования данного явления в целях обеспечения безопасности жизнедеятельности и труда человека.

С точки зрения практической значимости представляют интерес разработанные вычислительные алгоритмы, которые могут применяться в авиационной и ракетно-космической отраслях, когда речь заходит об анализе течений с химическими превращениями при горении, детонации, появлении токсичных компонент.

«*Институт математики  
Сибирского ФГУ*»

04 04 22

*Целями* данной диссертационной работы являются создание физико-математической модели течения многокомпонентного химически реагирующего высокоскоростного течения многокомпонентного газа в каналах с ударными и детонационными волнами, построение вычислительной модели для расчета параметров течения, исследование устойчивости решений, анализ инициирования и распространения процесса детонации.

*Научная новизна.* В диссертационной работе получен ряд важных результатов. Численно получены устойчивые режимы с пересжатой детонационной волной в докритической области для течения метано-воздушной горючей смеси в квазиодномерной нестационарной постановке. Ее продукты сгорания описывались многокомпонентной смесью совершенных газов, течение происходило в канале переменного сечения со сверхзвуковым потоком на входе и выходе. Химические превращения, присутствовавшие в смеси, описывались многостадийными кинетическими механизмами. Также учитывалось соблюдение условия неубывания энтропии смеси и наличие ударной/детонационной волны в докритической области. В некоторых уточненных постановках решена задача прохождения особой точки.

В рамках данной модели численно решена задача о распространении пересжатой детонационной волны в канале после отражения от закрытого торца. Рассмотрено получение термодинамических параметров из предположения, что при отраженной ударной волне достигается термодинамическое равновесие. Определены числа Маха падающей волны, при которых реализуется режим Чепмена-Жуге.

*Достоверность полученных результатов* следует из физической обоснованности постановки математических постановок расчетных задач, устойчивостью и сходимостью применяемых численных методов, сравнением полученных в ходе расчетов данных с экспериментом и результатами других авторов.

Диссертационная работа изложена на 163 страницах и состоит из введения, четырех глав и заключения.

*Первая глава* содержит описание используемых физико-математической и вычислительной моделей течения многокомпонентного газа с физико-химическими превращениями. Приведены результаты тестирования

разработанных вычислительных алгоритмов и программных кодов на классических задачах физической газовой динамики.

*Во второй главе* приводятся методика термодинамического анализа и результаты численного моделирования квазиодномерного стационарного течения в канале с двумя сужающимися и расширяющимися частями со сверхзвуковым потоком на входе и выходе при наличии в некотором сечении детонационной волны. Для метано-воздушной горючей смеси получены RR-диаграммы течения и приведены зависимости от скорости входного потока безразмерной площади сечения при которой может располагаться детонационная волна.

*В третьей главе* в квазиодномерной нестационарной постановке исследуется возможность устойчивого стационарного положения детонационной волны в канале, заполненном водородо-воздушной горючей смесью. Полученные устойчивые положения подтверждены путем численного решения прямой задачи теории сопла в квазиодномерной стационарной постановке, с использованием разработанных автором алгоритмов.

*В четвертой главе* исследуется течение в канале постоянного сечения, заполненном метано-воздушной горючей смесью после отражения ударной волны от закрытого торца. В одномерной и двумерной нестационарной постановке численно получены распределения параметров течения, доминирующие значения которых соответствуют решению задачи о равновесной отраженной ударной волне.

*Результаты, представленные в работе,* являются актуальными, востребованными, содержат научную новизну: показана методика термодинамического анализа стационарных течений смеси многокомпонентных совершенных газов в каналах со сверхзвуковым потоком на входе и выходе; даны оценки устойчивости подобных решений; предложен алгоритм прохождения особой точки в канале со стационарной детонационной волной; даны оценки распределения параметров в задаче об отраженной ударной волне с помощью решения задачи о равновесной отраженной ударной волне.

При общей положительной оценке диссертационной работы можно высказать также ряд замечаний:

1. Ссылки на источники в работе расположены не по порядку возрастания. Например, ссылки во введении начинаются сразу со [110].

2. Обзорная часть хорошо написана, однако, содержит достаточно скупое упоминание коллектива ИГиЛ СО РАН. Есть только ссылка на работу по

спиновой детонации [60], но не упоминаются труды В.М. Титова, В.В. Митрофанова.

3. При численном моделировании не учитываются диффузия, вязкость и теплопроводность. В рассматриваемом диапазоне параметров их изменения в зависимости от давления и температуры уже могут начинать вносить свой вклад в получаемое решение. То же самое можно сказать и о плотности, которая в работе предполагается постоянной. Нужно заметить, что корректный учет данных параметров значительно усложняет вычислительную задачу и, в общем случае, в квазиодномерной постановке не целесообразен.

4. В третьей главе работы при численном моделировании нестационарного течения с неравновесными химическими превращениями используется фиксированный контур канала, что не позволяет сделать вывод о влиянии кинетики химических реакций на положение и устойчивость детонационной волны при изменении геометрических характеристик.

5. В тексте диссертации отсутствует описание способа повышения порядка численной схемы до второго. Это представляло бы интерес, например, для определения тепловых потоков на стенки камеры.

6. Работа богата интересными вычислительными результатами. Но сравнение с экспериментальными данными представлено только с работой [84] по самовоспламенению метановоздушных смесей. Хотелось бы видеть больше подобных сопоставлений и не только по самовоспламенению. Например, даже сравнения X-T диаграмм с распределениями градиента плотности из работ Б.В. Войцеховского, Р.И Солоухина, А.А. Васильева и др. представляли бы большой интерес.

7. Есть замечания технического плана – в тексте присутствуют опечатки и неточности, в т.ч. на некоторых картинках. Например, на рис. 2.7 не указаны номера кривых, без которых разобраться в представленных газодинамических зависимостях затруднительно.

Приведенные замечания, тем не менее, не могут повлиять на общую положительную оценку работы. Многие пункты, скорее, являются излишними в рамках защиты кандидатской диссертации и могут рассматриваться в качестве пожеланий для дальнейшей работы.

По результатам научных исследований в рамках диссертационной работы опубликовано 16 работ, том числе 4 статьи в периодических изданиях, включенных в перечень ВАК и в международные реферативные базы данных Scopus и Web of Science, а также в материалах международных конференций и симпозиумов, известных широкому кругу специалистов.

Автореферат соответствует содержанию диссертации, а содержание диссертации соответствует указанной научной специальности. Работа производит хорошее впечатление. Представлено развитие физико-математических моделей для исследования детонационных процессов в каналах. Разработан собственный программный код, который может быть интегрирован с имеющимися программными решениями. Предложена и обоснована возможность применения экспресс-расчетов для предварительной оценки возможных параметров течения, что полезно в контексте экономии вычислительных и временных ресурсов.

Считаю, что данная диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, полностью удовлетворяющую требованиям, предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Кононов Дмитрий Сергеевич, заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент

Котов Михаил Алтаевич, ученый секретарь Института проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН), старший научный сотрудник Лаборатории лазерных разрядов, кандидат физико-математических наук.



М.А. Котов

31. марта . 2022

раб.тел. +7 495 434-22-10

kotov@ipmnet.ru

(ИПМех РАН, 119526, Москва, пр-т Вернадского, 101 к.1 www.ipmnet.ru)

Подпись к.ф.-м.н. Котова М.А. заверяю.

Директор ИПМех РАН, д.ф.м.н.



С.Е. Якуш

*С отзывом ознакомлен 04.04.22*