

## ОТЗЫВ

официального оппонента Мануйловича Ивана Сергеевича на диссертацию 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»

В настоящее время большой теоретический и практический интерес вызывают задачи, связанные с образованием и распространением детонационных волн в горючих смесях. Это связано как с задачами обеспечения взрывобезопасности, так и с созданием перспективных энергетических установок различного назначения, использующих высокоскоростное горение и детонацию. Несмотря на то, что высокоскоростное горение и детонация изучаются экспериментально и теоретически уже более ста лет, логика развития науки и потребности практики требуют совершенствования математических моделей и методов численного исследования течений горючих газовых смесей. Этим вопросам и посвящена настоящая диссертационная работа. В этой связи ее актуальность не вызывает сомнений.

Наблюдающийся в настоящее время бурный рост вычислительных возможностей персональных компьютеров и кластеров стимулирует развитие подходов к компьютерному моделированию быстропротекающих процессов в многокомпонентных реагирующих газовых смесях. В диссертационной работе автором разработаны оригинальные вычислительные алгоритмы и программные коды, которые позволяют численно исследовать задачи о течениях с ударными и детонационными волнами с учетом равновесных и неравновесных химических реакций, а также могут использоваться в составе комплексов программ многомерного моделирования.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы из 127 наименований, изложена на 163 страницах, содержит 67 рисунков и 20 таблиц.

Во введении дан обзор исследований по проблемам детонации, представлено обоснование актуальности темы диссертации, достоверности полученных результатов, научной новизны, научной и практической значимости работы, определены цели, задачи и методы исследования, кратко изложено содержание диссертации.

В первой главе представлена математическая модель, которая включает в себя уравнения многокомпонентной газовой динамики, дополненные уравнениями химической кинетики, а также описаны используемые численные методы и вычислительные алгоритмы. Приведены результаты решения тестовых задач.

Вторая глава содержит результаты исследования стационарного течения с волной детонации в канале переменного сечения со сверхзвуковым потоком на входе и выходе. Приводятся оригинальные вычислительные алгоритмы и данные расчетов течений метано-воздушной смеси в широком диапазоне начальных данных. В рамках одномерной теории определено местоположение и получены значения параметров стационарных детонационных волн. Установлено, что зависимость радиуса канала в точке, где располагается неподвижная волна детонации, от минимального радиуса канала может быть аппроксимирована линейной функцией.

Третья глава посвящена численному исследованию в рамках квазиодномерного подхода и многостадийной кинетики устойчивости стационарного течения с волной водородно-воздушной детонации в канале переменного сечения с двумя сужениями и расширениями. Используются метод установления и оригинальный вычислительный алгоритм решения

прямой задачи теории сопла. Получены как устойчивые режимы течения со стационарной детонационной волной, так и решения, в которых с течением времени детонационная волна выходит из канала.

Четвертая глава диссертации посвящена численному исследованию течения метано-воздушной смеси в ударной трубе, формирующегося после отражения падающей ударной волны от закрытого конца трубы. Получены режимы течения, когда в результате отражения по смеси распространяется как пересжатая детонационная волна с постоянными значениями параметров на ее фронте, так и самоподдерживающаяся волна с колебаниями значений параметров за волной. Определены соответствующие этим режимам параметры падающей ударной волны.

Научная новизна диссертации определяется тем, что автором: разработаны оригинальные вычислительные алгоритмы и компьютерные программы; проведен анализ стационарного режима течения горючей смеси с волной детонации и исследована устойчивость квазиодномерного течения многокомпонентной смеси с неравновесными химическими превращениями в канале переменного сечения со сверхзвуковым потоком на входе и выходе; предложен алгоритм расчета стационарного неравновесного течения с детонационной волной, обеспечивающий прохождение особой точки вблизи минимального сечения; установлено, что параметры течения при распространении детонационной волны вдали от торца ударной трубы соответствуют решению задачи о равновесной отраженной ударной волне.

Достоверность результатов обусловлена использованием апробированных математических моделей и численных методов, согласованием с экспериментальными и теоретическими данными, полученными другими авторами.

По диссертационной работе можно сделать следующие замечания:

1. Описание математической модели для смеси совершенных газов, приведенное в первой главе работы, явно избыточно. Аналогичные описания содержатся в большом числе статей и монографий. Было бы целесообразно его вообще не приводить или вынести в приложение.

2. Для моделирования горения водорода в работе используются два кинетических механизма, включающих 19 и 8 обратимых стадий. Однако сравнение результатов расчетов, проведенных с их использованием, отсутствует. Также нет сравнения с расчетными и экспериментальными данными по задержкам времени воспламенения.

3. В четвертой главе приведены результаты двумерных нестационарных расчетов распространения детонации в метано-воздушной горючей смеси, инициированной отраженной ударной волной. Как следует из рисунков, реализуется периодическая ударно-волновая структура детонации. Однако отсутствует оценка размеров полученных детонационных ячеек, являющихся важнейшей характеристикой при описании детонационных процессов. Также отсутствует исследование сеточной сходимости полученных результатов.

4. Все расчетные исследования детонации проводятся в областях простейшей формы, что существенно сужает область применения полученных результатов.

5. Хотелось бы получить объяснение по поводу употребления слова «постановка» по отношению к волне (например, стр. 23 диссертации).

Указанные замечания не влияют на положительную оценку работы, представляющей целостное научное исследование. Работа прошла необходимую апробацию путем представления на профильных научных конференциях, автор имеет по ней публикации, включенные в перечень ВАК и в международные системы цитирования. Автореферат правильно и полно

отражает содержание диссертации. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Считаю, что диссертационная работа, представленная Кононовым Д.С., имеет несомненный научный интерес в контексте исследования высокоскоростных течений в каналах с экзотермическими химическими превращениями, соответствует паспорту специальности и требованиям Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор Кононов Дмитрий Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник  
НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова  
Мануйлович Иван Сергеевич

*И.С. Мануйлович* 04.04.2022

e-mail: ivan.manuylovich@gmail.com

Нач. отдела кадров  
НИИ механики МГУ

*Подпись заверено*

*Григорьев*



*С отзывом ознакомлен 06.04.22. Рен*