

## Отзыв

члена диссертационного совета **Быкова Николая Юрьевича**  
на диссертацию Савеловой Карины Эдуардовны на тему «Регулярное  
и маховское отражение газодинамических разрывов с энерговыделением»,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы

В диссертации К.Э. Савеловой проведен теоретический и численный анализ регулярного и маховского отражения скачков уплотнения в условиях возможности импульсного энерговыделения и изменения химического состава газа на наиболее сильном (главном) скачке маховского отражения.

**Актуальность** темы исследования связана с необходимостью расширения достижений современной теории взаимодействия стационарных газодинамических разрывов (разработанной, в частности, с большим вкладом В.Н. Ускова и его учеников) на высокоскоростные течения, допускающие возбуждение детонационных эффектов на сильных ударных волнах, приобретающих тем самым свойства детонационных волн, а также изменение химического состава газовых смесей ввиду происходящих экзотермических реакций. Такого рода эффекты могут иметь место в воздухозаборниках перспективных прямоточных детонационных двигателях, в детонационных двигателях других видов (например, ротационных), в сопловых течениях реагирующих смесей, в сверхзвуковых струйных течениях, особенно при больших сверхзвуковых скоростях полета, чем обусловлена **практическая значимость** данной работы.

С точки зрения теоретической газовой динамики, данная работа представляет собой успешную попытку обобщения классической теории регулярного и маховского отражения, оптимизации ударно-волновых систем и структур на течения с энергоподводом на возникающих сильных газодинамических разрывах. Работа является оригинальной и вносит вклад в теорию взаимодействия стационарных газодинамических разрывов, хотя и использует результаты и модели, ранее достигнутые в рамках «классической» теории. В этом, на мой взгляд, состоит **научная ценность** данной диссертации.

**Достоверность** разработанных моделей и результатов, достигнутых с их помощью (то есть основных научных результатов диссертационного исследования) подтверждается путем сравнения с данными численного моделирования, выполненного соискателем и другими авторами, согласования с данными «классической» теории отражения скачков уплотнения, а также с экспериментальными данными других авторов.

Материал диссертационной работы структурирован следующим образом. Во **введении** к диссертации обосновывается актуальность выбранной темы



исследования, приводится краткий обзор исследований в данной предметной области, дается общая характеристика работы (формулируется цель исследования, основные научные результаты и положения, выносимые на защиту, обосновываются достоверность полученных результатов, их новизна, научная и практическая ценность, приводятся сведения о публикациях и апробации результатов).

**В первой главе** работы формулируются основные соотношения, позволяющие математически описать основные элементы таких систем – скачки уплотнения, стационарные детонационные волны, тройные конфигурации скачков уплотнения, волны разрежения и сжатия Прандтля-Майера, в том числе смежные с областью течения за главным скачком маховского отражения (так называемым «виртуальным соплом»). При этом производится необходимый для дальнейших исследований анализ изменения как непосредственно параметров потока, так и дифференциальных характеристик поля течения. В целом материал, изложенный в первой главе (кроме решения задачи о сопряжении волны Прандтля-Майера с областью квазиодномерного течения, сформированного другим газом) не носит оригинального характера и служит, в первую очередь, фундаментом для дальнейшего исследования.

**Во второй главе** работы исследуется «классическое» регулярное и маховское отражение скачков уплотнения в совершенном газе и возникающие при этом ударно-волновые структуры. В частности, рассматривается регулярное отражение косоугольного скачка уплотнения фиксированной интенсивности при переменном числе Маха набегающего потока. Математический аппарат, развитый в теории оптимальных ударно-волновых систем и структур (В.Н. Усков), позволил найти параметры регулярного отражения с максимумом силовой и тепловой нагрузки на отражающую поверхность, а также связать полученный результат с известным из теории отражения взрывных волн (О.С. Рыжов, С.А. Христианович).

Далее рассматривается маховское отражение косых скачков уплотнения в совершенном газе без химических реакций. Автору диссертации удалось обобщить частные решения для различных случаев отражения и взаимодействия и создать на их основе единый алгоритм расчета, позволяющий оценить параметры возникающей ударно-волновой структуры (в частности, высоту маховского скачка) и поля течения в целом. Путем сопоставления с экспериментальными результатами других авторов и данными численного моделирования показана высокая точность и достоверность созданной модели (в том числе по сравнению с разработанными ранее) в том случае, когда маховское отражение действительно реализуется. Неоднозначности решения для маховского отражения посвящен отдельный параграф второй главы диссертации.



**В третьей главе** диссертации рассматриваются ударно-волновые структуры течений с маховским отражением при возможности импульсного энерговыделения и изменения химического состава газовой смеси (прежде всего – изменения показателя адиабаты) на главном скачке.

Из анализа тройных конфигураций с прямым главным скачком («стационарных маховских конфигураций») следует, что возможность энерговыделения и понижения эффективного показателя адиабаты газовой смеси понижает порог образования маховского отражения, допуская маховское отражение более слабых скачков, которые в отсутствие подобных эффектов отражаются только регулярно. Установлена также предельная величина энерговыделения, ограничивающая возможность стационарной детонации при фиксированном числе Маха набегающего потока.

Далее в тексте главы 3 создана и описана оригинальная математическая модель течения с маховским отражением при наличии импульсного энерговыделения и изменения химического состава газовой смеси на главном скачке, являющаяся обобщением приведенной в главе 2 для сверхзвуковых течений совершенного газа без этих эффектов и согласованная с ней. Приведены примеры расчетов течений реагирующих газовых смесей в струях и каналах, продемонстрировано согласование полученных результатов с результатами численного моделирования в пакетах вычислительной газовой динамики, данными других авторов (А.Е. Медведев, А.В. Троцюк). В главе 3 приведены предложения об использовании обсуждаемых эффектов в перспективных прямоточных реактивных двигателях.

**Выводы** по каждой из глав и по работе в целом обоснованы и соответствуют результатам диссертационной работы. Текст работы завершается списком используемой литературы и перечнем публикаций авторов с указанием его личного вклада.

Основные результаты, изложенные в диссертации, **опубликованы** в 27 работах, включая статьи в ведущих рецензируемых изданиях, а также прошли **апробацию** в научном сообществе (более 20 докладов на научных конференциях, съездах и симпозиумах, в том числе отмеченных почетными дипломами).

**Замечания** к материалу диссертационной работы могут быть представлены следующим образом:

1) В главе 2 “Теоретический анализ ударно-волновых систем и структур в потоках газа с высокой сверхзвуковой скоростью” полезно было бы сделать оценку влияния эффектов реального газа (изменение показателя адиабаты, влияние вязкости) на результаты. Аналогично, в главе 3 “Анализ маховского отражения в сверхзвуковых течениях газа с возможностью импульсного энерговыделения на главном скачке” при разработке аналитических подходов – оценку влияния конечного времени протекания химических реакций и соответственно наличие конечной зоны химических реакций.

2) В главе 2 (стр.76) утверждается, что численные расчеты сверхзвуковой струи с использованием пакета ANSYS Fluent не дают возможность “оценить



размер маховского скачка и форму других газодинамических разрывов из-за их недостаточного разрешения”. Данное утверждение требует пояснения, так как коммерческие пакеты при правильном задании вычислительных параметров позволяют проводить расчет сверхзвуковых струй, истекающих в затопленное пространство, воспроизводить поля газодинамических параметров, и, соответственно, оценивать размеры характерных газодинамических структур.

3) В главе 3 для численного исследования метановоздушной смеси в симметричном сужающемся канале между клиньями применялась  $k-\omega$  SST-модель турбулентности. Далее в сходной задаче о плоскопараллельном втекании сверхзвукового потока воздуха в сужающийся канал между клиньями использовалась  $k-\epsilon$  Realizable модель турбулентности. Не совсем ясно чем вызван выбор модели турбулентности и каково значение числа Рейнольдса в рассматриваемых постановках.

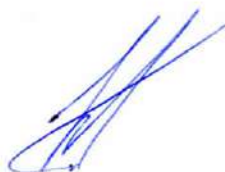
Данные замечания не снижают общую положительную оценку представленной диссертационной работы.

Диссертация Савеловой Марины Эдуардовны на тему «Регулярное и маховское отражение газодинамических разрывов с энергосыделением» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», а Савелова Марина Эдуардовна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Член диссертационного совета

Д.ф.м.н., без звания,  
Профессор кафедры физики  
СПбПУ Петра Великого

Дата 06.12.2024



Быков Николай Юрьевич

