

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МЕХАНИКИ  
им. А.Ю. ИШЛИНСКОГО  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИПМех РАН)**

пр. Вернадского, д.101, к.1, г. Москва, 119526  
Тел. (495) 434-00-17 Факс 8-499-739-95-31  
ОКПО 02699323, ОГРН 1037739426735  
ИНН/КПП 7729138338/772901001

12.12.2019 № 11504/01-2191.1-483

На № \_\_\_\_\_

**«УТВЕРЖДАЮ»**

И.о. директора института проблем механики  
им. А.Ю.Ишлинского РАН  
доктор технических наук



“12” 12 2019 года

**ОТЗЫВ**

**ведущей организации**

**Федерального государственного бюджетного учреждения науки "Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук" на диссертационную работу Гидаспова Владимира Юрьевича «Математическое моделирование высокоскоростных многофазных течений с физико-химическими превращениями», представленную к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»**

Диссертационная работа Гидаспова В.Ю. посвящена расчетно-теоретическому исследованию высокоскоростных течений газовых, газокапельных и металлогазовых смесей при наличии химических и фазовых превращений.

**Актуальность темы**

Разработка перспективных двигательных и технологических установок, исследование движения тел в атмосфере, создание систем пожаро- и взрывобезопасности приводит к необходимости углубленного исследования многофазных систем в которых протекают химические превращения, плавление, испарение конденсация и др. Важным инструментом при проведении данных исследований является математическое моделирование, которое позволяет существенно дополнить, а при наличии замкнутых математических моделей, вычислительных алгоритмов и программных средств, прошедших верификацию и

валидацию, заменить экспериментальные исследования. Это делает тему диссертации весьма актуальной.

### **Краткий анализ содержания работы**

Работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы (315 наименований), изложена на 413 страницах (включая 354 рисунка и 21 таблицу).

Во **введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель и кратко изложена структура диссертации.

В **первой главе** диссертации описана комплексная физико-математическая модель высокоскоростных течений многокомпонентного газа и частиц для случая равновесных и неравновесных химических и фазовых превращений. Приводятся варианты модели, которые используются в работе.

**Вторая глава** содержит описание используемых вычислительных алгоритмов расчета термодинамически равновесных и неравновесных течений многокомпонентных смесей. Приводятся вычислительный алгоритм решения задачи о распаде произвольного разрыва в многокомпонентной смеси газов с произвольными термодинамически допустимыми уравнениями состояния. Описана используемая в работе модификация метода Пирумова для численного интегрирования жестких систем уравнений химической кинетики и межфазного сопротивления и теплообмена, обеспечивающая автоматическое выполнение законов сохранения элементного состава. Приведен оригинальный алгоритм прохождения особой точки при решении прямой задачи теории сопла в одномерной постановке для многокомпонентного газа с химическими превращениями, описываемыми многостадийными кинетическими механизмами.

В **третьей главе** диссертации приводится разработанный автором сеточно-характеристический метод для моделирования многофазных течений с физико-химическими превращениями в каналах. Метод позволяет рассчитывать течения с явным выделением присутствующих в них сильных и слабых разрывов, таких как ударные волны, контактные разрывы, звуковые характеристики, граничные траектории распространения частиц, а также всех физически допустимых взаимодействий между ними.

В **четвертой главе** приводятся результаты исследования детонации горючих газовых, газокпельных и металлогазовых смесей. Приводятся результаты численного решения в автомодельной и неавтомодельной постановках задачи о распаде произвольного

разрыва в детонирующем газе, в случае, когда продукты сгорания представляют собой смесь совершенных газов при учете равновесного и неравновесного протекания химических реакций. Описано решение задачи о стационарной детонационной волне в канале переменного сечения со сверхзвуковым потоком на входе и выходе, в случае, когда горючая смесь и продукты сгорания представляют собой смесь совершенных газов. Приводятся результаты численных исследований в квазиодномерной нестационарной постановке с использованием оригинального сеточно-характеристического метода задачи о распаде произвольного разрыва в многокомпонентных многофазных горючих смесях. Представлены результаты математического моделирования структуры стационарных детонационных волн в газовых, газокапельных и металлогазовых горючих смесях.

В **пятой главе** представлен развиваемый автором вариант квазихимической модели гомогенной конденсации. Приведены вычислительные алгоритмы расчета равновесных и неравновесных функций распределения кластеров по размерам. Представлены результаты численных расчетов функций распределения по размерам кластеров аргона, меди, свинца, воды и серебра в условиях, характерных для технологических установок, в том числе и в присутствии инертных газов. Описаны особенности истечения конденсирующегося пара в вакуумную камеру.

В **шестой главе** приведены примеры применения разработанных автором численных методов, вычислительных алгоритмов и программ для расчета равновесного состава, решения уравнений химической кинетики и кинетики конденсации, межфазного сопротивления и теплообмена, интегрированных в программные комплексы многомерного моделирования. Приведены результаты численного решения ряда задач: горение и детонация газофазных и газокапельных сред в разноцелевых камерах сгорания; конденсация паров свинца в струях твердотопливных ракетных двигателей; обтекание летательного аппарата при движении с большой скоростью в атмосфере Земли.

В **заключении** кратко перечислены основные выводы и результаты диссертационной работы, выносимые на защиту.

### **Научная новизна результатов исследований**

Разработанные вычислительные алгоритмы моделирования многофазных течений с физико-химическими превращениями, модели термодинамики, кинетики химических и фазовых превращений, совместно с термодинамическим замыканием этих моделей,

обеспечивают при неубывании энтропии непрерывный переход от неравновесного состояния системы к термодинамическому равновесию. Вычислительные алгоритмы обеспечивают нахождение решения в широком диапазоне термодинамических параметров и соотношений между компонентами, выполнение законов сохранения и выход на равновесное решение, что позволяет их использовать при многомерном моделировании в областях сложной геометрической формы и большим числом мест подачи компонентов.

Автором разработан оригинальный сеточно-характеристический вычислительный алгоритм нахождения обобщенного решения квазиодномерных нестационарных гиперболических уравнений математической физики. Для многофазных течений с физико-химическими превращениями он позволяет получать детальные картины течения в каналах для произвольных составов смесей и способах их подачи, при наличии ударных и детонационных волн, границ раздела между смесями с различными составами, свойствами и процессами в них протекающими, а также зон распространения частиц дисперсной фазы.

В уточненной постановке численно решены модельные задачи:

- задача о распаде произвольного разрыва в многокомпонентной смеси газов с произвольными, термодинамически допустимыми, уравнениями состояния, для смеси совершенных газов в случаях, “замороженного”, “равновесного” и “равновесно-замороженного” составов;
- задача о распаде произвольного разрыва в детонирующем газе (в автомоделльной и неавтомодельной постановках) для случаев, когда продукты сгорания представляют собой смесь совершенных газов при учете равновесного и неравновесного протекания химических реакций. Получены решения, при которых параметры, получаемые при решении неавтомодельной задачи близки к автомоделльным;
- для случая сверхзвукового потока на входе и выходе сопла Лаваля в квазиодномерной постановке получено решение ( $RR$ -диаграмма) со стационарной детонационной волной. Рассмотрен случай произвольного соотношения радиусов входного, критического и выходного сечений, при этом горючая смесь и продукты сгорания представляют собой многокомпонентную смесь совершенных газов, течение до детонационной волны считается “замороженным”, а за детонационной волной “равновесным”.

#### **Степень обоснованности научных положений выводов и рекомендаций**

В основу диссертационной работы соискателем положена физико-математическая модель включающая законы сохранения массы, импульса, энергии и элементного состава, а

также термодинамическое замыкание, обеспечивающее неубывание энтропии и выполнение всех термодинамических тождеств. Используемые модели химической кинетики, кинетики конденсации, межфазного тепломассообмена прошли верификацию и валидацию. Выводы и рекомендации основаны на проведении широкомасштабных вычислительных экспериментах.

### **Достоверность**

Достоверность диссертационной работы обеспечивается строгостью используемых математических постановок, разработкой адекватных физико-математических моделей, устойчивостью и сходимостью используемых численных методов, тестированием вычислительных алгоритмов, а также согласованием результатов численного моделирования с результатами экспериментальных и расчетно-теоретических исследований других авторов.

### **Практическая значимость**

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанные вычислительные алгоритмы и программы могут использоваться для экспресс-анализа реагирующих многофазных течений в энергетических и технологических установках, а также в качестве элементов в составе комплексов программ многомерного моделирования. Предложенные в диссертации методики математического моделирования позволяют рассчитывать многофазные течения с физико-химическими превращениями в каналах, использоваться при моделировании таких явлений как горение, детонация, конденсация, образование токсичных компонент, позволяют определять детальную картину протекания неравновесных физико-химических процессов от их инициирования до перехода в равновесное состояние.

### **Замечания по диссертационной работе**

Среди недостатков работы отметим

1). автором выносятся на защиту разработанный оригинальный сеточно-характеристический метод. К сожалению автор не приводит в работе оценок точности, сходимости и других важных характеристик этого метода. Ни в одном примере

использования этого метода нет оценок зависимости решения от сетки и не показана сходимость получаемого решения по сетке;

2). в большинстве решенных в диссертации задач автор явно указывает, что вязкие эффекты не учитываются. В ряде случаев это довольно спорное утверждение. Например, в пункте 3.6 моделируется течение в холодном тракте установки ГУАТ ИПМех РАН. Длина установки 9 м, а диаметр 8 см. При нормальных условиях пограничные слои, формирующиеся на стенках установки за ударной волной, должны сомкнуться, что сильно повлияет на всё течение после отражения ударной волны от торца рабочей части. Поэтому при решении подобных задач необходимо обосновывать возможность пренебрегать вязкостью, теплопроводностью и т.п.;

3). в ряде задач, включенных в диссертацию и моделирующих конкретный эксперимент, нет сравнения с экспериментальными данными, например, п. 3.7. Численное моделирование детонации в ударной трубе;

4). автором допущена определенная небрежность при оформлении диссертационной работы. В тексте довольно много опечаток, часть рисунков низкого качества (например, рис. 3.21 и далее в главах 3 и 4).

Приведенные замечания не снижают научной ценности выполненной соискателем работы. Результаты диссертационной работы докладывались на большом числе научных семинаров, конференций и съездов. Исследования по тематике диссертации в разные годы были поддержаны грантами РФФИ. Основные результаты диссертации опубликованы более чем в 100 работах, 42 из которых в рецензируемых журналах рекомендованных ВАК.

### **Заключение**

Диссертация Гидаспова В.Ю., представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, является законченной научно-квалификационной работой, посвящена актуальной теме, выполнена автором на достаточно высоком научном уровне. Полученные автором результаты представляются достоверными, выводы и заключения – обоснованными. Основное содержание диссертации опубликовано в ведущих научных изданиях. Работа была апробирована на научных конференциях и симпозиумах различного уровня, включая международные. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.02.05 “Механика жидкости, газа и плазмы”.

Диссертационная работа Гидаспова В.Ю. на тему " Математическое моделирование высокоскоростных многофазных течений с физико–химическими превращениями" соответствует всем требованиям "Положения о порядке присуждения ученых степеней", утвержденного Постановлением правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г (в редакции Постановления правительства РФ № 1168 от 01 октября 2018 г.). В целом можно констатировать, что в работе Гидаспова В.Ю. разработаны теоретические положения и получены прикладные результаты, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области механики жидкости, газа и плазмы.

Учитывая изложенное выше, считаем, что В.Ю.Гидаспов заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 "Механика жидкости, газа и плазмы".

Проект отзыва заслушан на научно-исследовательском семинаре Лаборатории радиационной газовой динамики ИПМех РАН.

Зав. Лаборатории радиационной газовой динамики

ИПМех РАН

профессор, академик РАН



С.Т.Суржиков