

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
автоматизации проектирования
Российской академии наук,
доктор физико-математических наук



Никитин Илья Степанович
«26» декабря 2017 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Тухватуллиной Рузаны Рамилевны «Физико-математические модели двухфазного неизотермического двухскоростного течения пузырьковой среды», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация посвящена одной из актуальных проблем механики жидкости и газа – построению физико-математических моделей двухфазного течения жидкости с пузырьками инертного или химически активного газа. Широкое распространение двухфазных пузырьковых сред в технологических установках привлекает внимание исследователей к изучению законов их течения, например, при обосновании возможных сценариев развития аварийных ситуаций в контурах атомных электростанций или для использования пузырьковых смесей в силовых установках нового типа. Численное моделирование позволяет описать эффекты, которые иногда затруднительно или невозможно получить в натуральных экспериментах. Данными факторами обусловлена актуальность рассматриваемой работы.

Научная ценность диссертации заключается в разработанных математических моделях, учитывающих различные физические (колебание пузырьков, межфазный обмен количеством движения и энергией) и химические (глобальные и детальные кинетические механизмы реакций) процессы. Кроме того, продемонстрированы конкретные подходы по улучшению существующих двухфазных моделей с точки зрения их корректности. В работе уделяется большое внимание сравнению результатов расчетов с экспериментальными данными по структуре ударных и детонационных волн, их скорости распространения в пузырьковых средах, а также по скорости вовлечения жидкости и газа в движение за ударной волной. Также численно решена важная прикладная задача о передачи количества движения от ударной волны к пузырьковой среде.

Основная практическая ценность работы состоит в разработке и верификации иерархии из четырех корректных физико-математических моделей двухфазного двухскоростного неизотермического пузырькового течения, отличающихся разным уровнем детализации. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в теоретических и прикладных исследованиях, проводимых в МГУ, ИАП РАН, МФТИ и других организациях, в которых занимаются вопросами в области механики жидкости и газа.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения. Список литературы включает 69 наименований и достаточно полно отражает теоретические и экспериментальные исследования по теме диссертации. Общий объем диссертации 129 страниц.

Во введении обсуждается актуальность и цели работы, научная новизна и практическая ценность, степень достоверность результатов и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор литературы по двухфазным моделям пузырьковых течений, экспериментальным и теоретическим исследованиям ударных и детонационных волн в пузырьковых средах. Обзор существующих исследований пузырьковых течений

вполне позволяет понять место результатов диссертации в иерархии моделей двухфазных пузырьковых сред.

Во второй главе получена физико-математическая модель двухфазного двухскоростного неизотермического пузырькового течения методом пространственного осреднения. Приведено обоснование выражения для межфазного давления в результате решения классической задачи о движении сферы в безграничном объеме несжимаемой жидкости. Получены условия корректности задачи Коши предложенной модели в линейном приближении. Дано физическое объяснение, почему эти условия могут нарушаться.

В третьей главе получена физико-математическая модель двухфазного двухскоростного вязкого неизотермического пузырькового течения. В линейном приближении доказано, что после учета вязких сил задача Коши для предложенной модели становится корректной во всей области параметров. Проведено сравнение численных расчетов с экспериментальными данными по скорости движения контактной поверхности (газ – пузырьковая среда) за ударной волной, а также по передаче импульса от ударной волны к пузырьковой среде. Описаны результаты сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными в задаче о дозвуковом течении пузырьковой среды в сопле. Продемонстрировано влияние межфазного давления на структуру течения двухфазной среды.

В четвертой главе предложена физико-математическая модель двухфазного двухскоростного пузырькового течения с учетом радиальной инерции газовых пузырьков. Описан новый численный алгоритм для предложенной модели. Проведен анализ корректности задачи Коши в линейном приближении. Приведены результаты сравнения численных расчетов с экспериментальными данными по структуре и скорости ударной волны в пузырьковой среде, а также по скорости движения фаз за ударной волной.

В пятой главе предложена физико-математическая модель двухфазного двухскоростного пузырькового течения с учетом радиальной инерции реакционноспособных газовых пузырьков. В качестве детального механизма для моделирования ацетиленокислородных смесей использовалась модель горения углеводородных топлив GRI-Mech, состоящая из 325-ти химических реакций и 53 веществ. Также проведены расчеты с использованием глобального кинетического механизма, состоящего из трех реакций и восьми веществ. Описан алгоритм численного решения, который основан на широко распространенном методе расщепления по физическим процессам: сначала решаются уравнения кинетики химических реакций в газовом пузырьке при постоянном объеме, а затем делается «гиперболический шаг», описанный в предыдущей главе. Приведены результаты сравнения расчетных результатов с экспериментальными данными по скорости детонационной волны в зависимости от начального газосодержания и вязкости несущей жидкости, а также по структуре детонационной волны.

Автореферат отражает содержание и выводы диссертационной работы. Основные результаты работы полностью опубликованы в печати, в том числе в ведущих иностранных журналах. Особенно хотелось бы отметить публикации в таких журналах, как *International Journal of Multiphase Flow* и *Shock Waves*.

Замечания по диссертационной работе.

1. В обзоре литературы среди прочих упоминается модель на основе системы уравнений Баера-Нунциато и отмечается, что она гиперболична по всей области (что, не вполне корректно, см., например, Schwendeman D.W. et al., *J. Comp. Phys.*, 2006, 212). При этом не делается заключения о том, почему автор не выбрал для реализации эту «почти всегда» гиперболическую систему уравнений, а провел большую работу по исследованию и корректировке другой, исходно негиперболической системы уравнений.

2. Часть результатов в диссертации получены с использованием программы AVL FIRE. При этом отсутствуют хотя бы общие сведения о численных методах интегрирования определяющих систем уравнений в данной программе, а также о том, каким образом разработки автора диссертации были туда имплементированы, что затрудняет восприятие результатов расчетов в разделе 3.2.

3. В разделе 4.2 представлен численный метод для решения уравнений физико-математической модели двухскоростного течения пузырьковой среды с учетом динамики колебаний газовых пузырьков. При этом не делается анализа свойств предложенного метода – порядков аппроксимации по времени и пространственной координате, свойства консервативности, монотонности, которые являются крайне важными для расчетов ударных и детонационных волн (см., например, монографию Магомедов К.М., Холодов А.С. Сеточно-характеристические численные методы. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во Юрайт, 2017).

4. Вероятно, в силу сложности выражений для давления на межфазной границе, в диссертации не проведен полный характеристический анализ определяющих систем уравнений моделей (не построены в явном виде матрицы правых и левых собственных векторов), что препятствует применению при их численном решении хорошо развитого к настоящему времени аппарата, например, сеточно-характеристических методов (см. монографию из предыдущего замечания). Данное замечание является скорее пожеланием для дальнейшей работы по развитию темы диссертационного исследования.

5. В тексте диссертации встречаются опечатки. Например, в четвертом выводе на стр. 116 – «...о передачЕ...».

Несмотря на указанные замечания, диссертация Тухватуллиной Р.Р. выполнена на хорошем уровне, содержит научную новизну и практическую значимость.

Диссертация полностью удовлетворяет критериям ВАК, установленным Положением о присуждении ученых степеней (п. 9), утвержденным Правительством Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842, по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы; а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Данный отзыв обсужден и одобрен на научном семинаре отдела Вычислительных методов и турбулентности Института автоматизации проектирования РАН 19 декабря 2017 года, протокол № 2.

Старший научный сотрудник ИАП РАН,
к.ф.-м.н.

Уткин Павел Сергеевич

Организация – место работы: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт автоматизации проектирования РАН

Должность: старший научный сотрудник

Почтовый адрес: 123056, Москва, 2-ая Брестская ул, д.19/18

Телефон: 8 (499) 250-02-62

Адрес электронной почты: icad@icad.org.ru

Web-сайт организации: www.icad.org.ru

Подпись и сведения заверяю.

Ученый секретарь ИАП РАН,
к.т.н.

Сызранова Нина Геннадьевна