

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Фомина Павла Аркадьевича
«Моделирование взрывных и детонационных течений в многофазных средах с химическими реакциями», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа П.А. Фомина посвящена разработке моделей и исследованию процессов в химически активных газовых, газожидкостных и газопылевых смесях с учетом распространения по ним ударных и детонационных волн. Рассматриваемые в диссертации задачи связаны в первую очередь с проблемами пожаро- и взрывобезопасности. Техногенные утечки жидких и газообразных горючих регулярно происходят в различных странах, причем не только в слаборазвитых, но и в высокотехнологичных. Чтобы не допускать превращения этих аварий в катастрофы, необходим комплекс мероприятий, делающих невозможными воспламенение и, тем более, детонацию возникающих при утечках газовых и многофазных смесей. Для разработки технологий предотвращения таких катастроф необходимы всесторонние знания о воспламенении газовых, газожидкостных и газопылевых горючих смесей, об их поведении при распространении по ним ударных и детонационных волн. Так как из всех возможных сценариев развития событий в химически активных смесях наибольшую опасность представляет развитие детонации, то особенно важным здесь является определение и исследование условий, при которых неконтролируемое возникновение газовой детонации является невозможным. Таким образом, разработка адекватных моделей и исследование взрывных и детонационных процессов в газовых, газожидкостных и газопылевых системах очень важны для повышения безопасности химических производств, угольных шахт, иных промышленных и гражданских объектов. Следует также заметить, что рассматриваемые в диссертации задачи важны для развития некоторых производственных технологий, авиационного и ракетного двигателестроения. Поэтому **актуальность и важность** избранной темы диссертационной работы не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Отличительной особенностью диссертации является то, что каждая глава снабжена отдельным достаточно подробным введением с обзором литературы по соответствующему направлению исследований. *Во введении* диссертационной работы обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цели и задачи диссертации, ее научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также формулируются положения,

выносимые на защиту. Кроме этого, описывается апробация результатов работы на научных мероприятиях, личный вклад автора.

Первая глава диссертационной работы посвящена разработке физически обоснованных, относительно простых и достаточно точных обобщенных моделей химической кинетики и химического равновесия в газовых, газожидкостных и газопылевых смесях, а также верификации предложенных моделей. Предложена модель химического равновесия в водородо- и углеводородо-кислородных газовых смесях без и при наличии инертных разбавителей. Разработана модель химического равновесия в газовой фазе двухфазных газожидкостных смесей при наличии межфазного массообмена. Предложена модель химического равновесия в смеси химически реагирующего газа с химически инертными микрочастицами, находящимися в тепловом равновесии с газом. Разработана двухстадийная модель химической кинетики детонационного сгорания метана (первая стадия – индукция, вторая – основное тепловыделение). Предложен набор двухстадийных моделей кинетики детонационного сгорания углеводородного горючего произвольного состава, газовых смесей двух и более горючих, а также детонационного сгорания газовой смеси, содержащей монотопливо. Предложенные модели позволяют описывать распространение детонационных волн в том числе в газокапельных и газопленочных смесях. Приведены примеры использования предложенных моделей – в частности, проведены расчеты параметров детонационной волны Чепмена-Жуге в газовых смесях, ее отражения от жесткой стенки, а также рассчитана адиабатическая температура газозонового пламени.

Во второй главе диссертации проводится теоретическое и экспериментальное исследование взрывных и детонационных процессов в химически реагирующих пузырьковых средах. Хотелось бы выделить интересные результаты экспериментального изучения процесса инициирования взрыва пузырьков первичной ударной волной и преломленными вторичными ударными волнами, вызванными взрывами соседних пузырьков. К сожалению, кадры видеосъемки данного процесса, приведенные в диссертационной работе, не вошли в автореферат диссертации – вместо них в автореферате были помещены схематичные рисунки. Также во второй главе разработаны модели ударно-волновой динамики и взрыва одиночных пузырьков, проведено моделирование детонационных волн в пузырьковых смесях различных типов. Рассмотрены периодические взрывные процессы в пузырьковых средах, содержащих жидкое монотопливо, и обосновано предположение о возможности многократного взрыва одиночного пузырька при воздействии на него серии ударных волн. Предложена концепция источника мощных периодических акустических сигналов в жидкости (называемого "акустическим лазером") на основе многократного прохождения детонационной волны по пузырьковой смеси с монотопливом в качестве жидкой фазы.

В третьей главе диссертационной работы показана принципиальная возможность конденсации паров горючего в ударной волне, распространяющейся по реальной газовой смеси (переобогащенной горючим смеси паров циклогексана с кислородом и азотом). Следует заметить, что этот результат опровергает традиционное представление о невозможности конденсации паров за фронтом ударной волны. В данной главе также проанализировано влияние рассматриваемого процесса конденсации после прохождения ударной волны на взрывобезопасность и показано, что конденсация, увеличивая содержание окислителя в газовой смеси, может расширить ее взрывные пределы по начальной концентрации паров. Сделана оценка характерного времени конденсации и показано, что наличие в газе взвеси твердых частиц увеличивает скорость конденсации и массу перешедших в жидкость паров.

В четвертой главе диссертации показана принципиальная возможность конденсации паров горючего при адиабатическом сжатии и нагреве газа в пузырьке за фронтом ударной волны, распространяющейся по жидкости (на примере кислородсодержащего пузырька, находящегося в жидком циклогексане). Проанализировано влияние рассматриваемого эффекта на взрывобезопасность и показано, что конденсация меняет химический состав газа в пузырьке, увеличивая концентрацию окислителя, что может существенно расширить взрывные пределы пузырька по начальному давлению, температуре и амплитуде ударной волны. Сделана оценка характерного времени конденсации и показано, что скорость конденсации достаточно велика, чтобы существенно изменить химический состав газа за время первой пульсации пузырька.

Пятая глава диссертации посвящена исследованию ослабления и подавления волны газовой детонации химически инертными микрочастицами. На основе разработанной модели химического равновесия предложен алгоритм расчета параметров детонации Чепмена-Жуге в смесях реагирующих газов с химически инертными микрочастицами, в том числе с учетом добавления в такие смеси частиц угля. При анализе подавления газовой детонации облаком химически инертных микрочастиц рассмотрено несколько критериев подавления детонационной волны и рассчитана минимальная концентрация микрочастиц, обеспечивающая подавление детонации. Проанализировано влияние физико-химических свойств частиц на ослабление и гашение детонационной волны и показано, что ослабление и подавление детонационной волны более эффективно в случае частиц с высокой теплоемкостью, а при наличии плавления – с большей теплотой фазового перехода.

В заключении формулируются основные результаты диссертационной работы.

Научные положения и выводы, сформулированные в диссертации, достаточно **обоснованы** и не вызывают сомнений. Все основные **результаты** диссертации **являются новыми** и опубликованы в работах автора, среди которых 36 статей в изданиях, индексируемых в международных базах Web of Science и/или Scopus, в том числе более 10 статей в высокорейтинговых зарубежных журналах (Combustion Science and Technology,

Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Chemical Engineering Journal, Chemical Engineering Science, Experiments in Fluids). **Достоверность результатов** диссертационной работы обусловлена использованием классических подходов механики многокомпонентных сред, химической физики и теории горения при разработке и развитии моделей, многочисленной проверкой и соответствием полученных результатов расчетов эксперименту. Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

По работе можно отметить следующие **замечания и дискуссионные моменты**:

1. В диссертации в качестве уравнения состояния газа во всех моделях использовалось уравнение Клапейрона. Насколько допустимо применение этого уравнения при моделировании процессов в пузырьковых системах, ведь перепад плотностей в пузырьках может быть огромен?

2. При описании некоторых проведенных исследований информация о них представлена в чрезвычайно сжатом виде. В частности, в параграфах 1.2.5 и 1.2.7, посвященных моделям стационарной гетерогенной детонации в газокапельной среде и в системе "пленка жидкого горючего – газ", не приведены уравнения моделей, а только лишь присутствует краткое описание моделей с указанием ссылок на соответствующие публикации автора. Необходимость использования дополнительной литературы при чтении диссертации усложняет ее использование в учебных или исследовательских целях.

3. В работе присутствуют повторения. В частности, в параграфе 1.2.1 на стр. 54 повторно вводятся обозначения "НФ" и "НЗ", несмотря на то, что эти обозначения уже были введены в параграфе 1.1 на стр. 29. А в параграфе 1.3.1 на стр. 84 в разных абзацах дважды разными словами высказывается предположение, что во время периода индукции молекулы воды химических превращений не претерпевают.

4. При описании некоторых экспериментов или проведенных расчетов не указываются значения ряда используемых параметров. Несмотря на то, что это практически не влияет на понимание результатов, было бы полезно видеть полный перечень используемых параметров.

5. В работе кроме орфографических и пунктуационных опечаток присутствуют также опечатки смысловые. Например, на стр. 188 в первом абзаце параграфа 3.4 дважды переставлены местами "тау со звездочкой" и "тау". Однако следует заметить, что опечатки не влияют на понимание диссертации.

Сделанные замечания не отражаются на общей **положительной оценке** диссертационной работы. Диссертация Фомина Павла Аркадьевича «Моделирование взрывных и детонационных течений в многофазных средах с химическими реакциями» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой на основе

выполненных автором исследований сформулированы и обоснованы научные положения, совокупность которых можно квалифицировать как крупное научное достижение в механике многокомпонентных реагирующих сред. **Диссертационная работа полностью соответствует всем критериям**, установленным для диссертаций на соискание ученой степени доктора наук в «Положении о присуждении ученых степеней», утвержденном Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор – Павел Аркадьевич Фомин – заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук

по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Луценко Николай Анатольевич

« 10 » феврале 2020 г.

Организация – место работы: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук,

лаборатория механики жидкости и газа.

Должность: и.о. главного научного сотрудника, заведующий лабораторией.

Почтовый адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5.

Телефон: +7 902 555 4413, +7 423 255 44 13.

Адрес электронной почты: NickL@inbox.ru

Web-сайт организации: <http://www.iacp.dvo.ru/>

Подпись и сведения заверяю

Ученый секретарь ИАПУ ДВО РАН

К.Т.Н.



Змеу Светлана Борисовна