

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и цифровому развитию
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Дроговоз П.А.
«20» февраля 2024 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию **БАСАКИНОЙ Светланы Сергеевны**

на тему «Гидродинамика направленного подводного взрыва неидеально детонирующих высокометаллизированных составов», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17 — химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

Повышение энергоэффективности подводного взрыва зарядов конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) и, в частности, усиление эффекта действия подводного взрыва в заданном направлении являются актуальными для различных областей применения: от штамповки взрывом до морской сейсморазведки и вскрытия тяжелых ледовых полей. Одним из возможных способов повышения общей энергии взрыва является введение в состав ВВ сверхстехиометрического количества добавок активных (гидрореагирующих) металлов, например, алюминия или магния, которые, будучи разогретым до высоких температур в процессе детонации ВВ, начинают смешиваться и дореагировать с окружающей водной средой в процессе расширения первичных продуктов взрыва (ПВ). Реализация такого сценария взрыва имеет две основные сложности:

- дополнительный порошкообразный металл, балластирующий состав энергетического материала (т.е. базового ВВ), существенно снижает его детонационную способность при добавках от 10 % по массе и выше;
- дореагирование дисперсного металла с водой контролируется в основном смешением, однако естественного смешения продуктов детонации (ПД) с водой, как правило, бывает недостаточно для того, чтобы избыточный металл был полностью использован в реакции, причем за времена весьма короткие, чтобы повлиять на волну сжатия в воде.

В работе Басакиной С.С. были рассмотрены обе эти проблемы. В частности, были разработаны детонационноспособные алюминизированные взрывчатые составы (ВС) с

содержанием металла до 55 % по массе. Детонационная способность таких составов была обеспечена оригинальным образом: путем заполнения металлического каркаса в заряде из частиц жидким взрывчатым веществом (ЖВВ) с добавкой твердого окислителя - перхлората аммония (ПХА). Для решения второй проблемы – увеличения скорости смешения с водой готового к реакции после детонации ВВ избыточного металла, была апробирована идея проведения взрыва заряда ВС в барботированной воде. Обнаруженный в ходе этих работ эффект направленного действия взрыва в случае, когда заряд взрывается внутри пузырькового туннеля, соединяющего заряд и цель, был также охарактеризован и всесторонне исследован. Проведенные в работе Басакиной С.С. экспериментальные исследования детонационной способности подкреплены результатами численного моделирования для трехкомпонентных неидеально детонирующих ВС, имеющими в совокупности как практическое значение, так и научную новизну. В ходе экспериментов по исследованию параметров волн сжатия в воде были разработаны и применены оригинальные методики, использовавшиеся в таких исследованиях впервые.

Следует особо отметить следующие научные достижения и основные результаты выполненной Басакиной С.С. диссертационной работы:

1. Изучен механизм детонации сильно забалластированного алюминием смесового ВС и установлена ведущая роль фронта детонационной волны (ДВ), распространяющегося по ЖВВ. Экспериментально откалибрована математическая модель детонации, с помощью которой была определена готовая к реакции с водой доля металла, не участвующего в распространении детонации по заряду. Эти данные, использованные для расчета энергетике подводного взрыва, показали хорошее согласие с удельными энергиями, определенными по методу измерения удельных энергий пульсации и гидроударной волны в воде.

2. Показано, что в зарядах малого диаметра скорость детонации высокометаллизированных ВС в тонкой оболочке увеличивается в случае его погружения в воду. Это говорит о большем влиянии инерции оболочки на скорость детонации, нежели ее механическая прочность.

3. Проведено прямое сравнение удельных энергий подводного взрыва новых высокометаллизированных ВС с известными бризантными ВВ. Показано, что полная удельная энергия взрыва более чем в два раза превышает штатные ВВ. При этом установлено, что определение компонент удельной энергии традиционным способом по периоду пульсации и спаду гидроударной волны может быть завышенным в случае неидеального взрыва с дореагированием.

4. Установлено, что взрыв высокометаллизированного состава в гетерогенной пузырьковой среде приводит к увеличению степени смешения частиц алюминия с водой и, как следствие, общей энергетики взрыва. При этом установлено влияние параметров пузырьковой среды (размеров и концентраций пузырьков) на эффект, что открывает путь к управлению энерговыделением посредством изменения начальных условий.

5. Обнаружен и подробно исследован эффект направленного действия волн сжатия при взрыве высокометаллизированных ВС в направлении оси цилиндрической пузырьковой колонны, и в случае, когда колонна оканчивается препятствием. Взрыв оказывает на мишень существенно больший механический эффект, чем без пузырькового канала. Показано, что данный эффект масштабируется для зарядов с увеличенной на порядок массой.

Представленные в диссертационной работе результаты являются практически важными, так как фактически открывают новый способ эффективного управления энерговыделением при проведении подводных взрывов.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, формулировки основных результатов и выводов и списка цитируемой литературы из 133 источников, изложена на 144 страницах и включает 58 рисунков и 14 таблиц.

Во введении установлены основные цели, задачи и методы исследования, обоснована актуальность. Приведены полученные результаты и положения, выносимые на защиту, а также объяснена их научная новизна.

В первой главе проведен анализ литературы по исследованиям детонационной способности металлизированных ВС, влияния на детонацию металлических добавок, и определено, что наиболее перспективным является использование в ВС дисперсного алюминия. Также в главе обосновано увеличение интенсивности реакций ПД с водой за счет неустойчивости, возникающей на границе вода – ПД. Обоснована методика проведения подводного взрыва в пузырьковой среде для увеличения степени дореагирования избыточного металла в составе заряда. Выбраны высокометаллизированные смесевые составы с показателем Al/O до 2.26, что существенно превышает таковой в известных ВС, и проведены исследования их детонационной способности.

Вторая глава посвящена экспериментальным и теоретическим исследованиям детонации выбранных трехкомпонентных составов на основе ЖВВ, алюминия и ПХА. Проведены измерения скоростей распространения ДВ при различных начальных условиях. В экспериментах варьировался тип оболочки, инициатора, диаметр заряда и компонентный состав. Это позволило в результате теоретически рассчитать скорости

экзотермического превращения и взаимодействия компонентов в ДВ. В главе также описана модель неидеальной детонации, использованная в расчетах, и представлены определенные расчетами теплоты взрыва и состава продуктов детонации.

В третьей главе диссертационной работы обоснована методика исследования подводных взрывов неидеально детонирующих высокометаллизированных ВС в сплошной и гетерогенной пузырьковой среде. Рассмотрены результаты реперных сравнительных экспериментов, обоснованы методы измерения удельной энергии подводного взрыва, представлены данные о взрывной калибровке экспериментального бассейна. Объяснена и обоснована методика измерения энергетики подводного взрыва при помощи тяжелого подвижного препятствия, путем измерения его параметров движения после взаимодействия с волнами сжатия. Представлены результаты характеристики гетерогенной пузырьковой среды.

В четвертой главе работы представлены результаты экспериментов по измерению параметров волн сжатия, рожденных взрывами идеально и неидеально детонирующих зарядов в сплошной и барботированной воде. Доказан эффект распространения волн сжатия вдоль пузырькового канала от заряда к препятствию. Показано, что наличие гетерогенной среды вокруг заряда увеличивает интенсивность дореагирования алюминия с водой. При этом колонна из пузырей перераспределяет энергию взрыва вдоль нее и формирует направленную волну сжатия. Представлены данные о влиянии длины пузырьковой колонны, состава взрывчатой смеси, концентрации пузырьков, геометрии постановки эксперимента на результирующие параметры движения подвижного препятствия. Представлены данные о масштабируемости эффекта с зарядами на порядок большей массой.

Достоверность результатов обеспечена использованием известных и апробированных методов исследования, большой выборкой полученных экспериментальных данных. Результаты в целом не противоречат современным представлениям о подводном взрыве как обычных, так и металлизированных ВВ, описанных в литературе.

Результаты диссертационной работы представлены в 5 публикациях в российских и международных изданиях, входящих в перечень ВАК (из них 5 в базах цитирования WoS/Scopus). Материалы диссертации апробированы на всероссийских и международных конференциях. Автореферат отражает основное содержание диссертации.

Несмотря на высокий научный уровень работы Басакиной С.С. и положительное впечатление от ознакомления с ней, к представленной работе имеется ряд замечаний и вопросов:

1. В Главе 2 для термодинамического моделирования параметров детонации многокомпонентных ВС, включая расчет теплоты взрыва и состава ПД, используется разработанная в МГТУ им. Н.Э.Баумана компьютерная программа, описанная в работах [99, 100, 114], которая является ранней версией более универсального кода «ТЕРМО-2010» (автор: *Имховик Н.А.*, 2010). В обеих программах в качестве термического уравнения состояния (УрС) смеси газообразных ПД используется уравнение Беккера-Кистяковского-Вильсона (ВКВ) с возможностью применения следующих наборов параметров УрС ВКВ : RDX и TNT (*Мейдер Ч.*), ВКВ-R (*Фингер М., Ли Е., Хелм Ф.*) и ВКВ-RR (*Губин С.А., Одинцов В.В., Пенекин В.И.* - последний набор получен с учетом фазовой диаграммы состояния конденсированного углерода в ПД при высоких давлениях и температурах). Из краткого описания приводимых в работе результатов неясно: какой именно набор параметров УрС ВКВ (и соответственно, набор коволюмных факторов) использовался в расчетах; в каком фазовом состоянии рассматривался углерод; учитывалась ли его сжимаемость и сжимаемость других конденсированных фаз (алюминий, его оксид, бемит, байерит и др. соединения)?
2. При термодинамическом моделировании процесса изоэнтропического расширения ПД из состояния Чепмена-Жуге состав ПД может рассчитываться как равновесный, частично неравновесный (по температурам и концентрациям конденсированных фаз) или как "замороженный", т.е. постоянный. "Заморозка" может осуществляться принудительным заданием содержания компонентов ПД, как в точке Ч-Ж, так и в любой точке на изоэнтропе расширения ПД. Выбор точки «заморозки» (фиксации состава ПД) является важным, т.к. определяет, и состав конечных ПД, и теплоту взрыва. Из Главы 2 неясно, осуществлялась ли данная процедура для ПД алюминизированных ВС и проводилось ли сравнение с экспериментальными данными (и для каких ВС) хотя бы по теплоте взрыва?
3. Исследованные неидеальные ВС имеют одинаковую массовую долю нитрометана – 17 %. Однако, принимая во внимание большую удельную поверхность частиц алюминия марки ПАП-2, в зарядах ВС с различным содержанием алюминия слои нитрометана, распределенные по поверхности частиц, будут сильно отличаться. Почему в таком случае выбрано именно такое соотношение между ЖВВ и порошкообразными компонентами? Было ли исследовано, каким образом относительное содержание нитрометана влияет на детонационные характеристики ВС и кинетику энерговыделения за фронтом ДВ?
4. В таблице 2 (стр. 39) приведены характеристики исследуемых в работе смесей и их зарубежных аналогов, а также их рецептуры. Однако в столбце «Состав» рецептуры 2-х последних ВС указаны неверно: для Н-6 сумма вес.% равна 110, а для НВХ-3 – 90 вес.%, в последнем составе содержание алюминия должно быть 35%, а не 25% (см. [120]).

Вместе с тем, отмеченные недостатки не снижают научной и практической значимости работы С.С. Басакиной.

Содержание диссертационной работы и отзыв на диссертацию обсуждались на заседании научно-технического семинара кафедры «Высокоточные летательные аппараты» (СМ-4) 07.02.2024 г., протокол № 02/1.

Диссертация полностью соответствует требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, и «Изменений, которые вносятся в Положение о присуждении ученых степеней», утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации № 355 от 21 апреля 2016 года, и является научно-квалификационной работой, в которой установлены закономерности подводных взрывов высокометаллизированных составов в гетерогенной среде барботированной воды, имеющие важное значение для развития физики горения и взрыва. Автор диссертации Басакина Светлана Сергеевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17 — химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Заведующий кафедрой

«Высокоточные летательные аппараты» (СМ-4)

МГТУ им. Н.Э. Баумана

д.т.н., профессор, академик РАН


В.В. Селиванов
«14» 02 2024 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

(национальный исследовательский университет)

(МГТУ им. Н.Э.Баумана)

Адрес: 105005, г. Москва, ул. Бауманская, д. 5. стр.1

Тел.: +7(499)261-69-00, 63-38

E-mail: selivanovvv@bmstu.ru