

БАСАКИНА Светлана Сергеевна

**Гидродинамика направленного подводного взрыва неидеально
детонирующих высокометаллизированных составов**

1.3.17 – химическая физика, горение и взрыв,
физика экстремальных состояний вещества

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук

Научный руководитель: **Комиссаров Павел Владимирович**
кандидат физико-математических наук
Федеральный исследовательский центр
химической физики им. Н.Н. Семёнова
Российской академии наук
старший научный сотрудник

Официальные оппоненты: **Ершов Александр Петрович**
доктор физико-математических наук, доцент
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева
Сибирского отделения Российской академии
наук
главный научный сотрудник

Мочалова Валентина Михайловна
кандидат физико-математических наук
Федеральный исследовательский центр проблем
химической физики и медицинской химии
Российской академии наук
старший научный сотрудник

Ведущая организация: Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана

Защита состоится 27 марта 2024 года в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.1.243.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук по адресу:
119991 г. Москва, ул. Косыгина, д.4, корп. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук.

Автореферат разослан 26 января 2024 года.

Автореферат размещен на сайте Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации 17 января 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.243.02
кандидат физико-математических наук

С.Ю. Сарвадий

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Повышение энергоэффективности подводного взрыва, в том числе за счет затянутого энерговыделения и реакции металлического горючего с окружающей водой является актуальной проблемой современной физики взрыва. Современные эксперименты со взрывчатыми составами, содержащими частицы различных металлов, показывают обнадеживающие результаты. Настоящая работа направлена на развитие нового типа высокометаллизированных взрывчатых составов, предназначенных для увеличения эффективности подводных зарядов. Это возможно за счет повышения энергетики подводного взрыва путем вовлечения в реакцию с продуктами детонации (ПД) окружающей воды и увеличения доли энергии взрыва, направленной непосредственно на механическое воздействие на объект.

Различные факторы, контролирующие смесеобразование и скорость горения частиц металла с водой, оказывают сильное влияние на характеристики подводного взрыва. Это существенно затрудняет разработку оптимальной конструкции заряда. Проблему создания сложной взрывчатой системы, в которой вещество реагирует в несколько стадий как на этапе детонации в заряде, так и при расширении во внешней среде необходимо решать комплексно, поскольку все стадии такого взрыва последовательно влияют на конечный эффект. Поэтому диссертация включает в себя исследования как детонационных свойств высокометаллизированных составов, так и формирования волны сжатия в реагирующей гетерогенной среде типа «вода – газ – высокометаллизированные продукты детонации».

Цель и задачи исследования. Цель исследования – повысить эффективность действия подводного взрыва в заданном направлении. Для достижения этой цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Определить механизм распространения детонационного процесса в сильно забалластированном металлическим горючим составе. С помощью параметрического моделирования разработать смесевые

высокометаллизированные составы, ПД которых содержат большое количество разогретого до реакционных температур металла.

2. Экспериментально определить параметры волн сжатия, рожденных неидеальным подводным взрывом с дореагированием высокометаллизированных ПД с окружающей водой.

3. Реализовать сценарий направленного подводного взрыва путем смешения реагирующих высокометаллизированных ПД в предварительно созданном пузырьковом канале в воде с последующим дореагированием и созданием быстродвижущейся в сторону препятствия гетерогенной среды.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Экспериментальные данные о детонационной способности высокометаллизированных составов на основе порошка алюминия, твердого окислителя перхлората аммония (ПХА) и нитрометана (НМ), а также результаты численного моделирования детонации таких составов получены впервые.

2. Впервые для характеристики неидеальных подводных взрывов высокометаллизированных составов в воде с пузырьками воздуха одновременно с измерением давления гидроударных волн (ГУВ) для оценки полного действия взрыва было также измерено действие на мишень течений пузырьковой среды.

3. Впервые экспериментально обнаружен новый эффект направленного действия подводного взрыва при иницировании высокометаллизированного заряда в гетерогенной среде типа «вода + пузырьки воздуха».

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты проведенных исследований закладывают научные основы знаний о высокометаллизированных смесевых взрывчатых составах, способных рождать при взрыве в воде волны сжатия с параметрами, превышающими таковые для известных штатных металлизированных конденсированных взрывчатых веществ (ВВ). Определены детонационные характеристики для высокометаллизированных составов с различным показателем Al/O , что позволяет выбирать из спектра рецептур смесевых составов необходимые для решения конкретных практических задач. В диссертации заложены основы математического моделирования

вышеназванных трехкомпонентных составов. Расчетная модель откалибрована на экспериментальных данных о скоростях детонации. Это позволяет вести параметрическое моделирование с целью создания состава с требуемыми заранее заданными детонационными характеристиками. Кроме того, продемонстрирована возможность направленного действия высокометаллизированного состава при взрыве под водой вдоль воздушно-пузырькового канала.

Результаты исследования могут найти применение в ряде практических задач, где требуется создание под водой высокоимпульсной волны сжатия с высокой степенью трансформации химической энергии ВВ в механическую энергию воздействия на препятствие, в том числе в заранее заданном направлении. В первую очередь к ним относятся: морская сейсморазведка, штамповка взрывом, вскрытие тяжелых ледовых полей, морская добыча полезных ископаемых и т.д.

Методы исследования. Для экспериментального определения параметров волн сжатия, образующихся при подводных взрывах идеально и неидеально детонирующих зарядов в сплошной воде и в воде, содержащей свободно всплывающие пузырьки воздуха, проводились взрывы зарядов массой несколько десятков грамм в металлической емкости, заполненной водой. Регистрация давления и оценка механического воздействия взрыва проводилась с помощью пьезоэлектрических датчиков давления и подвижного препятствия, снабженного акселерометром. Эксперименты по определению детонационной способности высокометаллизированных составов на основе ПХА, алюминия и НМ выполнены на зарядах различного диаметра в оболочках из стали либо пластика, в том числе и с инерциальным подпором оболочки водой. Для возбуждения детонации использовались инициирующие устройства различного типа. Скорость детонационного процесса измерялась контактными датчиками-отметчиками. Для теоретического исследования детонации трехкомпонентных составов на основе ПХА, алюминия и НМ использована квазиодномерная математическая модель стационарной неидеальной детонации смесевых ВВ с экзотермическим превращением, протекающим в несколько стадий. С помощью модели проведено

параметрическое моделирование распространения детонационного процесса в двух- и трехкомпонентных взрывчатых составах с варьированием констант, входящих в уравнения экзотермического превращения компонентов. Согласие расчетов с результатами опытов по скорости детонации позволило выбрать значения варьируемых констант и на этой основе определить размеры зоны реакции детонационной волны, доли компонентов смеси, успевших сгореть в пределах зоны реакции и распределение характеристик течения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Для распространения детонации в сильно забалластированном металлическим горючим составе взрывчатой смеси необходима добавка жидкого взрывчатого вещества.

2. Изменение долей количества избыточного металла и добавки ЖВВ в составе новых энергетических материалов позволяет оптимизировать подводный взрыв за счет управления ударноволновой и пульсационной составляющими энергии.

3. Направленный подводный взрыв реализуется в случае, когда волны сжатия и течения распространяются в специально подготовленном пузырьковом канале от заряда к цели.

Степень достоверности полученных результатов. Достоверность результатов и обоснованность выводов работы опираются на большой экспериментальный материал по подводным взрывам, полученный с использованием различных измерительных методик. Детонационные характеристики используемых составов, полученные в результате экспериментов, верифицированы с помощью математического моделирования.

Апробация результатов. Результаты исследований, представленных в диссертации, докладывались и обсуждались на: V Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии» (Москва, Россия 2019); 44th – International Pyrotechnics Seminar «Europyro» (Тур, Франция 2019); XXVI Всероссийском семинаре с международным участием по струйным, отрывным и нестационарным течениям (Санкт-Петербург, Россия 2022).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 6 печатных работ. Работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных в ВАК – 5.

Личный вклад автора. Экспериментальные результаты, представленные в диссертации, получены при непосредственном участии автора. Обработка и анализ результатов экспериментов, подготовка статей и докладов на конференциях осуществлялись лично автором, либо при его непосредственном участии.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из перечня сокращений и обозначений, введения, четырех глав, формулировки основных результатов и выводов и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 144 страницах и содержит 58 рисунков, 14 таблиц и библиографию из 133 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены основные цели и задачи работы и используемые методы исследования. Коротко описаны основные научные результаты, их научная новизна и приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен анализ отечественной и зарубежной литературы по исследованию влияния различных металлизированных добавок на параметры подводного взрыва. Показано, что использование частиц алюминия наиболее эффективно, поскольку такие смеси производят большое количество прогретого алюминия, способного реагировать с окружающими паром и водой, выделяя тем большее количество тепловой энергии и водорода, чем больше металла в ВВ. С другой стороны, применение сильнозабалластированных составов с соотношением $Al/O > 0.4$ не дает существенного преимущества, так как весь алюминий не успевает полностью прореагировать с водой. Однако есть способ увеличить интенсивность реакции за счет увеличения неустойчивости, возникающей на границе вода – ПД. Это возможно путем проведения взрывов в среде, состоящей из участков сильно различающихся по плотности, например, в

воде с пузырями воздуха или иного газа. Также известно, что в некоторых случаях наблюдается усиление ГУВ в воде при столкновении с препятствием, например, когда ГУВ взаимодействует с гетерогенной средой, находящейся вблизи или в непосредственном контакте с защищаемым объектом. Проведен анализ экспериментальных исследований детонационной способности составов с высоким показателем Al/O (до 2.26), которые могли детонировать в сравнительно небольших диаметрах благодаря добавке жидкого моно ВВ. Представлены сведения о физико-математическом моделировании детонационных процессов в многокомпонентных смесевых высокометаллизированных составах типа НМ + Al + ПХА.

Вторая глава посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию детонационных характеристик сверхбогатых составов типа НМ + Al + ПХА, основные характеристики которых представлены в таблице 1.

Таблица 1. Составы используемых смесей

Название	Вещество	Состав	Масса компонента, г	ρ , г/см ³	Бустер, г	Al/O
1:1	Al+ПХА +НМ	Al (ПАП-2)	10.79	1.27	4	1.31
		ПХА(40 мкм)	10.79			
		НМ	4.42			
1.5:1	Al+ПХА +НМ	Al (ПАП-2)	12.95	1.22	4	1.85
		ПХА(40 мкм)	8.63			
		НМ	4.42			
2:1	Al+ПХА +НМ	Al (ПАП-2)	14.39	1.18	4	2.26
		ПХА(40 мкм)	7.19			
		НМ	4.42			
Тритона л	ТНТ+30 % Al	ТНТ	18.2	0.83	4	1.02
		Al (ПАП-2)	7.8			
Гексоген	Гексоген	-	30	1.06	-	-
6ЖВ	Аммонит	Аммиачная селитра (79 вес.%)	23.7	1.12	-	-
		ТНТ (21 вес.%)	6.3			
НВХ-3	НВХ-3	31 вес.% гексоген, 29 вес.% ТНТ, 25 вес.% Al, 5 вес.% парафин	-	-	-	0.808

В качестве основного идеального ВВ, с которым проводились сравнения параметров подводного взрыва, был выбран аммонит марки 6ЖВ, плотность которого близка к плотности исследованных неидеальных смесей. Подготовленные составы засыпались в цилиндрические оболочки из полипропилена (ПП) или полиэтилена низкого давления марки ПЭ100 (ПНД) с внутренним диаметром 20 мм, толщиной стенки 4 мм и длиной до четырех калибров.

Для проверки наличия в исследованных зарядах детонационного процесса проведены эксперименты по измерению скорости детонации в удлиненных зарядах, взрываемых на воздухе и в воде и инициируемых различными источниками: навеской аммонита 6ЖВ; навеской тетранитропентаэритрита (ТЭН); путем перехода горения в детонацию (ПГД) стехиометрического состава алюминий (ПАП-2) + ПХА в стальной оболочке (см. рисунок 1 и таблицу 2). Скорость распространения детонации контролировалась на 4–7 базах электроконтактными или оптоволоконными датчиками.

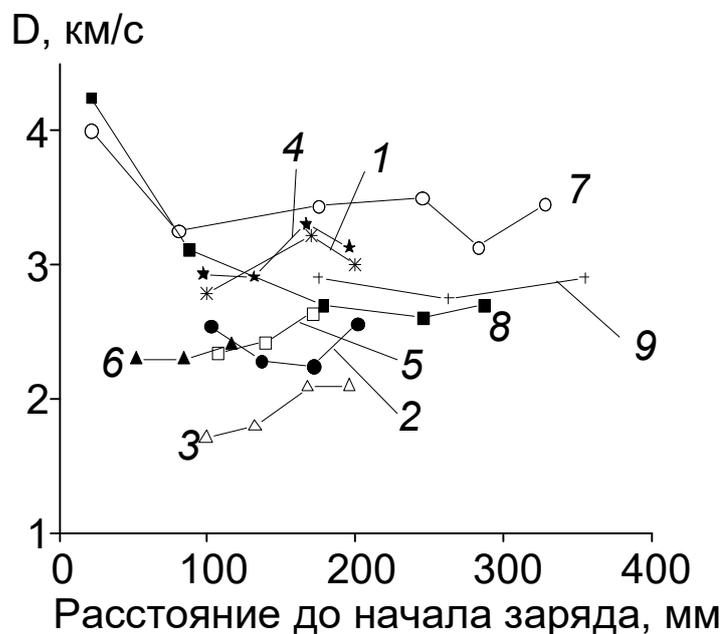


Рисунок 1. Измеренные зависимости скорости детонации D от расстояния до начала заряда

Опыты показывают, что скорость детонации для составов 1:1 с инерциальным подпором оболочки водой ниже в сравнении с зарядами в стальной оболочке (3.0 м/с против 3.2 м/с), но выше, чем в оболочке из ПНД на воздухе (2.47 м/с). Также снижение скорости наблюдается при увеличении содержания алюминия. При этом, как видно из рисунка 1, все заряды на длине в 10 калибров не демонстрируют существенного снижения скорости детонации, что позволяет сделать вывод о наличии полноценного детонационного процесса в зарядах, использованных в основной серии экспериментов. Кроме того, различные источники инициирования дают близкие скорости детонации в зарядах с инерциальным подпором водой.

С целью получения информации о скоростях экзотермического превращения и взаимодействия компонентов смеси для исследуемых композиций проведены расчеты с помощью компьютерной программы, созданной ранее на основе квазиодномерной математической модели стационарной неидеальной детонации двух-трехкомпонентных смесей. Модель сформулирована следующим образом: волна неидеальной детонации, которая распространяется с постоянной скоростью D по заряду взрывчатого материала цилиндрической формы, заключенному в массивную оболочку, состоит из ударного фронта, примыкающей к нему зоны реакции и звуковой поверхности (поверхности Чепмена-Жуге), отрезающей зону реакции от тыльных волн разрежения.

Таблица 2. Условия и результаты проведенных измерений установившейся скорости детонации в высокометаллизированных зарядах

№	Оболочка	Смесь	Инициатор	d, мм	l, мм	S, мм	D, км/с	ρ , г/см ³
1	ПП+вода	1:1	6ЖВ 4 г	21.4	235	4	3.0±0.1	1.18
2	ПП+вода	1.5:1	6ЖВ 4 г	21.2	240	4	2.41±0.08	1.25
3	ПП+вода	2:1	6ЖВ 4 г	20.7	238	4	1.9±0.1	1.29
4	ПП+вода	1:1	ТЭН 2.5 г	21.4	236	4	3.07±0.09	1.17
5	ПНД	1:1	6ЖВ 4 г	21.3	211	3	2.47±0.09	1.32
6	ПНД	1:1	6ЖВ 4 г	21.2	156	3	2.33±0.04	1.36
7	сталь	1:1	ПГД	18.0	500	4	3.2±0.2	1.46
8	сталь	2:1	ПГД	18.0	500	4	2.4±0.1	1.35
9	ПНД+вода	1:1	ПГД	21.0	400	3	2.9±0.1	1.45

Реагирующая среда в зоне реакции представляет смесь исходных компонентов и продуктов их химического превращения. Химическое превращение для смесей типа НМ + ПХА + Al включает три стадии: разложение НМ (стадия 1), разложение ПХА и взаимодействие с продуктами разложения НМ (стадия 2) и горение алюминия в продуктах взаимодействия НМ и ПХА (стадия 3). Предполагается, что скорость стадии 2 лимитируется разложением ПХА. Взаимодействие с продуктами разложения НМ, окружающими частицы ПХА, протекает гораздо быстрее. Химическое превращение инициируется в процессе вязко-пластического схлопывания пор в пределах фронта волны. Предполагается, что задержкой инициирования можно пренебречь в масштабе времени химического превращения. Константы скоростей превращения НМ и ПХА определяются с помощью расчета детонационных характеристик двойных смесей этих компонентов.

Расчеты проведены для зарядов в стальных оболочках диаметром 18 мм с толщиной стенок 6 мм и верифицированы экспериментальными данными (см. таблицу 3). Помимо рассчитанной скорости детонации приведены также длина зоны реакции, от фронта волны до точки Чепмена-Жуге, давления на фронте и в точке Чепмена-Жуге, а также массовые доли компонентов, успевших сгореть в пределах зоны реакции. Видно, что отношение указанных давлений P_f/P_{cj} несколько больше 2. Длина зоны реакции растет по мере уменьшения содержания НМ, изменяясь в диапазоне от 7.4 мм до 14.4 мм. К концу зоны реакции во всех рассмотренных вариантах сгорает подавляющая часть НМ и всего несколько процентов алюминия. Количество сгоревшего ПХА составляет немного меньше половины в смесях 1:1 и чуть больше одной трети в смесях 2:1. Получено хорошее согласие по скоростям детонации в опытах и расчетах без какой-либо корректировки с использованием коэффициентов скоростей превращения НМ и ПХА, которые были определены ранее.

С помощью таблицы 3 для оценки полной теплоты взрыва проведен термодинамический расчет детонации и дальнейшего дореагирования ПД для тройных смесей НМ + Al + ПХА (см. таблицу 4). Выделение энергии можно

Таблица 3. Результаты расчетов характеристик детонации тройных смесей
 НМ + ПХА + Al

Добавка НМ к дисперсной массе, вес. %	Эксперимент			Расчет					
	Пористость	ρ , кг/м ³	D , м/с	D , м/с	L , мм	P_f/P_{cj} , ГПа	Доли сгоревших компонентов, вес. %		
							НМ	ПХА	Al
Алюминий / ПХА = 1:1									
17	0.26	1460	3370	3520	11.6	7.5 / 3.4	13.5 из 14.5	19.5 из 42.7	2.8
23	0.17	1580	3920	4050	10.0	9.8 / 4.7	17.0 из 18.7	17.6 из 40.5	
30	0.09	1700	4540	4610	8.9	6.1	21.0 из 23.1	16.5 из 38.5	
40	0.00	1750	5450	5220	7.9	15.7 / 7.9	25.6 из 28.6	14.5 из 35.5	
Алюминий / ПХА = 2:1									
10	0.42	1250	1300	2460	14.4	3.7 / 1.7	14.0 из 14.5	12.0 из 30.3	2.3
17	0.33	1350	2270	2780	12.4	4.6 / 2.2	13.2 из 14.5	12.1 из 28.6	
23	0.18	1540	3400	3390	10.2	6.6 / 3.1	16.3 из 18.7	10.0 из 27.0	
30	0.06	1690	3950	4170	8.5	9.7 / 4.8	19.6 из 23.1	8.9 из 25.6	
40	0.00	1790	4800	4900	7.4	13.4 / 6.6	24.0 из 28.6	8.1 из 24.0	

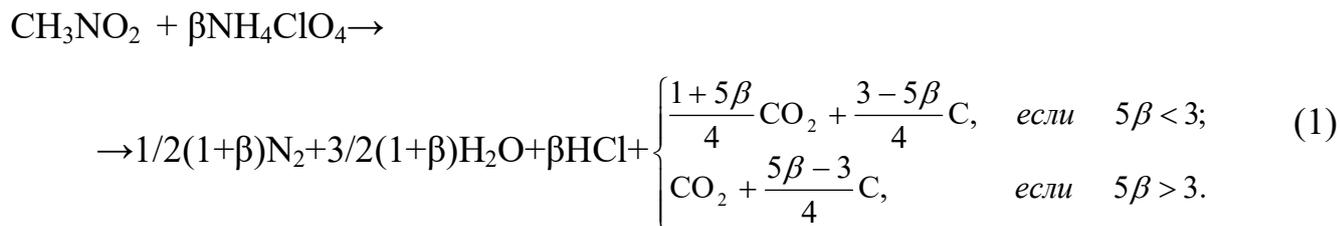
Примечание: D – скорость детонации; L – ширина зоны реакции от фронта волны до точки Чепмена-Жуге; P_f и P_{cj} – давления на фронте волны и в точке Чепмена-Жуге.

Таблица 4. Рассчитанная теплота взрыва тройных составов

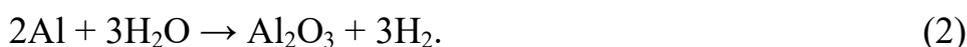
Состав	Стадии, МДж/кг			Полная теплота, МДж/кг
	1 (НМ+Al+ПХА, вес. %)	2 (Al+ПХА, вес. %)	3 (Al+вода, вес. %)	
1:1	1.90 (15.0+3.0+20.0=38.0)	1.00 (2.5+22.5=25.0)	5.50 (37.0 Al)	8.40
1.5:1	1.75 (15.0+2.5+16.0=33.5)	0.85 (2.0+18.0=20.0)	7.00 (46.5 Al)	9.75
2:1	1.45 (15.0+2.0+12.0=29.0)	0.75 (2.0+16.0=18.0)	8.00 (53.0 Al)	10.20

разделить на три стадии:

1. Детонация (инертны от 1/2 до 2/3 ПХА и большая часть Al (>97 вес.%):



В сбалансированном составе отношение ПХА к НМ $\beta=3/5=0.6$ (один моль НМ на 0.6 моль ПХА). Незначительное количество Al (<3 вес.%) реагирует с водой, образовавшейся при реакции (2):



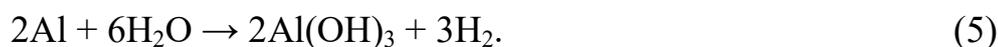
2. Горение Al с ПХА в волне разрежения:



3. Дореагирование Al с водой может происходить двумя способами:



или



Третья глава посвящена методике исследования неидеального подводного взрыва. Для оценки стойкости емкости к возможным нагрузкам проведены предварительные взрывные эксперименты с зарядами аммонита 6ЖВ и состава 1:1 (см. таблицу 1) массой 50 г. Уровни максимального давления составили 80 атм для аммонита и около 160 атм для смеси 1:1. В случае алюминизированного состава на 2-ой мс наблюдаются волна сжатия и на 38-ой мс вторичная вспышка, связанные с дореагированием избыточного алюминия с ПД и водой. Определено, что длительности импульса сжатия, рожденного неидеальным взрывом навесок массой до 50 г в воде, составляют 0.7 мс. Таким образом, для обеспечения достаточного для наблюдений времени циркуляции ГУВ необходимо иметь емкость, в которой от заряда до ближайшей жесткой стенки будет не менее 1 м. Также обнаружены существенные колебания стенок емкости, из-за которых невозможно учесть потери энергии на перемещение масс воды вследствие

деформаций. Поэтому на некотором расстоянии над зарядом размещается тяжелый цилиндр, который снабжен акселерометром для измерения механического действия волн сжатия в воде на его торец, выраженного в сообщении некоторой кинетической энергии. При этом для измерений импульса необходимо также учитывать время циркуляции волны до момента разгрузки (1.0-1.5 мс).

Для опытов использовалась стальная цилиндрическая емкость с толщиной стенки 12 мм, объемом 13.5 м^3 и высотой 4.5 м (см. рисунок 2), установленная вертикально в песчаный грунт. Эксперименты, поставленные по методике с подвижным полупогруженным препятствием импульсомером (см. рисунок 2а)

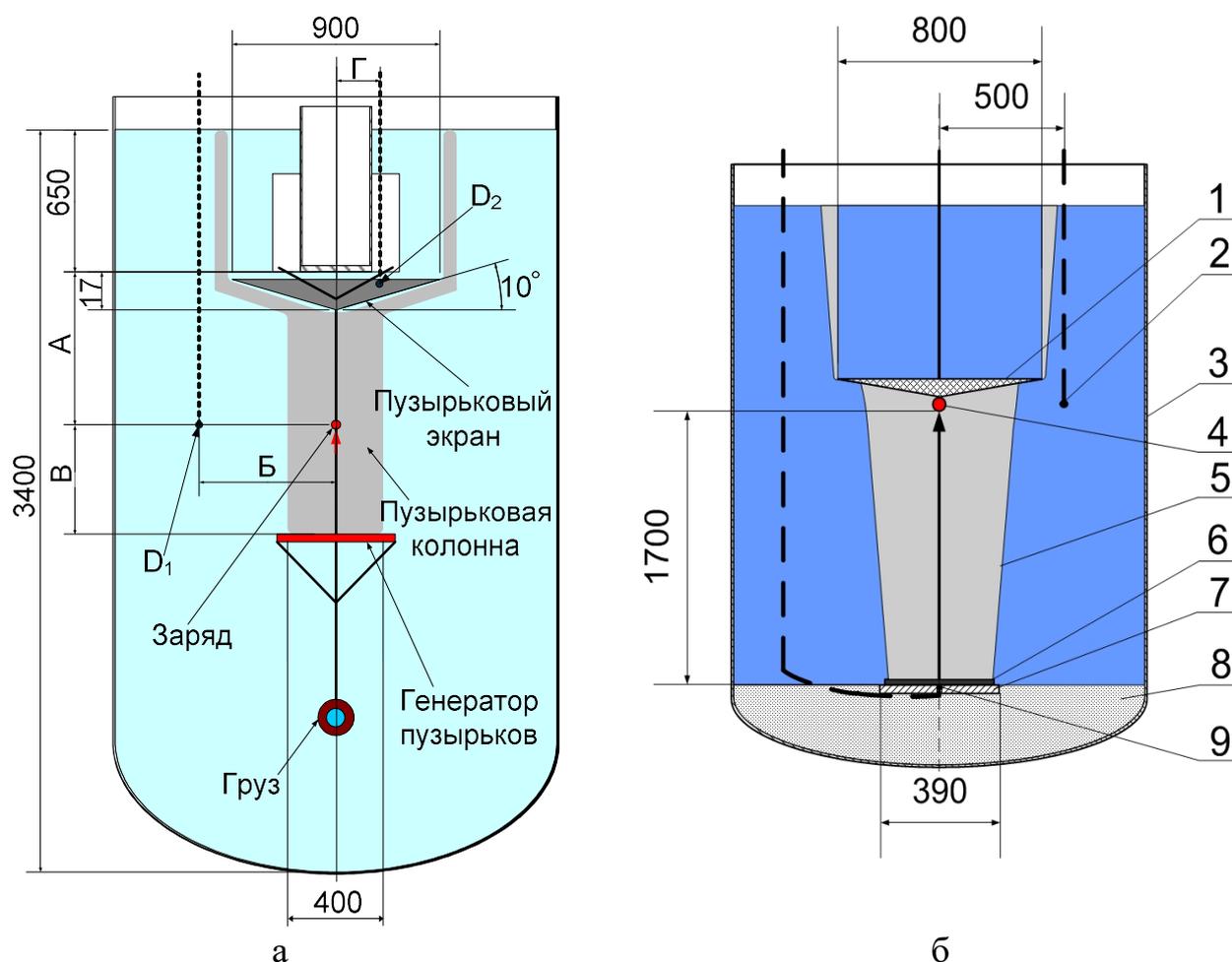


Рисунок 2. Схема установки: а – с подвижным препятствием, где D_1 и D_2 – датчики давления, размещенные на уровне заряда и у торца импульсомера; б – с неподвижным препятствием на дне емкости: 1 – пузырьковый экран, 2 – датчик давления, 3 – емкость, 4 – заряд, 5 – пузырьковая колонна, 6 – генератор пузырьковой колонны, 7 – стальная плита, 8 – гравий, 9 – датчик давления

показали, что временное окно для регистрации параметров волны сжатия меньше, чем длительность процесса. Поэтому были проведены дополнительные эксперименты (см. рисунок 2б), в которых пузырьковая колонна поднималась от дна емкости с мишенью к заряду, а выше него экранировалась конусообразным экраном, разводящим пузырьки на такую площадь, что средняя концентрация газовой фазы над зарядом была менее эффективной как для поглощения ГУВ, так и для проникновения ПД. В качестве мишени использовалась стальная плита с установленным заподлицо датчиком давления. При анализе сигналов датчиков давления определились уровни максимального давления, импульс падающей волны сжатия и период первой пульсации, если это было возможно. В результате рассчитывается удельная энергия ГУВ e_s :

$$e_s = \frac{4\pi R^2}{m\rho_w c_w} \int_0^{6.7\tau} P^2 dt, \quad (6)$$

где R – расстояние между датчиком давления и зарядом, ρ_w – плотность воды на глубине размещения заряда, m – масса заряда, c_w – скорость звука в воде на глубине размещения заряда с учетом температуры окружающей воды в месте размещения, τ – постоянная времени процесса, течение которого давление на датчике снижается от максимума (фронта) до величины $P_m/e \approx 0.37 P_m$, P – зависимость давления от времени. Тогда энергия пульсации e_b имеет вид

$$e_b = \frac{1}{8c_w^3 K_1^3} \left[\sqrt{1 + 4Ct_b \left(\frac{P_h}{P_{hm}} \right)^{\frac{5}{6}}} - 1 \right]^3, \quad (7)$$

где $K_1 = 1.135 \rho_w^{1/2} / P_h^{5/6}$, где P_h – сумма атмосферного и гидростатического давлений, P_{hm} – сумма нормального атмосферного давления на поверхности водоема и гидростатического давления на глубине размещения заряда, t_b – период пульсации, коэффициент C находится как $C=b/a^2$, где a и b – константы, определяемые по калибровочной зависимости.

Для калибровки емкости проведены взрывы зарядов ТНТ массой 5 г, 10 г, 20 г и 40 г с регистрацией давления датчиком, размещенным на уровне заряда на расстоянии 0.7 м от него. По записям давления (см. рисунок 3) была определена калибровочная зависимость для емкости: $t_b = 0.3m^{1/3} + 0.0307m^{2/3}$. По ней

вычислены необходимые для определения энергии пульсации константы. Для сравнения также проведены опыты с алюминизированными составами 1:1, 1.5:1 и 2:1 и такими известными ВВ как тритонал и гексоген. В таблице 5 представлены

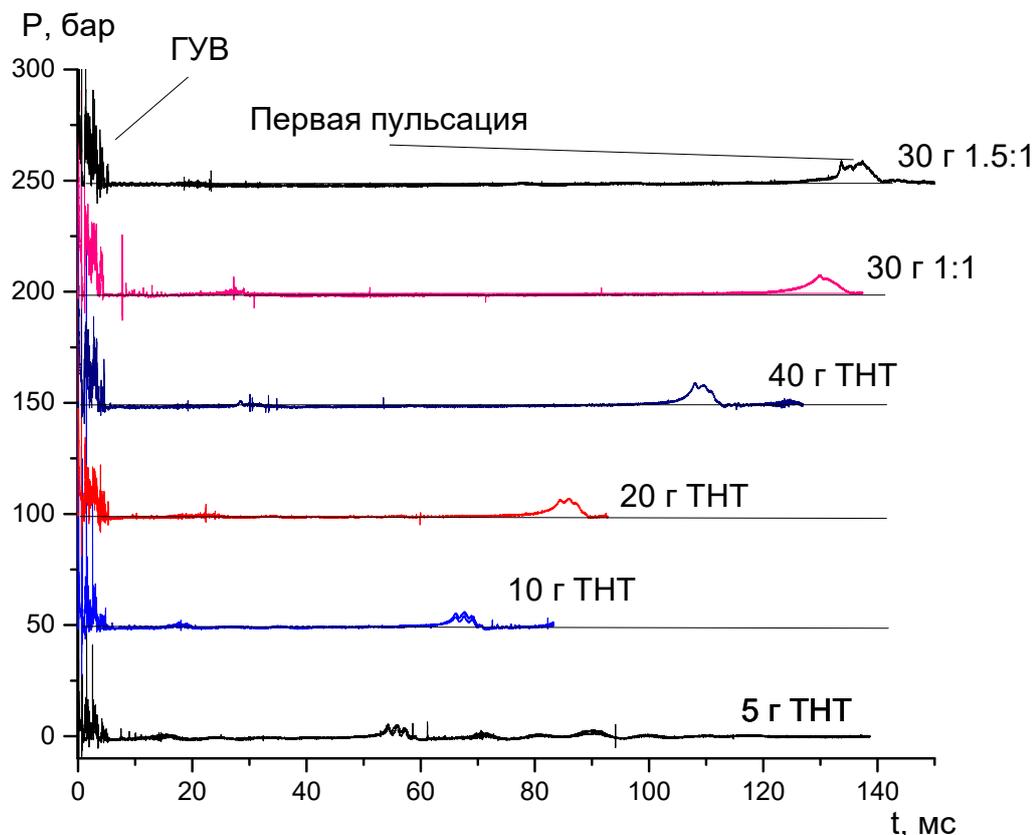


Рисунок 3. Записи давления при взрывах зарядов тротила различной массы и тройных составов типа 1:1 и 1.5:1

Таблица 5. Удельные энергии ударной волны e_s , пульсации e_b и взрыва $E_{теор}$ для различных составов и ВВ

Состав	m , г	e_s , МДж/кг	e_b , МДж/кг	$e_s + e_b$, МДж/кг	$E_{теор}$, МДж/кг
1:1	30	1.49	6.76	8.25	8.40
		1.36	7.34	8.70	
		1.41	6.92	8.33	
1.5:1	30	0.86	8.67	9.53	9.75
		0.94	9.00	9.94	
		0.92	9.10	10.02	
2:1	30	0.67	7.98	8.65	10.20
		0.64	8.03	8.67	
		0.61	7.91	8.52	
Тротил	5	0.99 (1.01)	2.71	3.70	4.19
Тротил	10	0.94 (1.01)	2.69	3.63	
Тротил	20	0.97 (1.01)	2.77	3.74	
Тротил	40	0.98 (1.01)	2.89	3.87	
Тритонал	30	1.20 (1.31)	4.77	4.97	—
Гексоген	30	1.24 (1.39)	3.16	4.40	—

величины e_s и e_b , определенные по формулам (6) и (7) с учетом по записей давления от взрывов в сплошной воде, и рассчитанная полная удельная энергия взрыва $E_{теор}$. Полученные значения близки к теоретическим кроме опытов с составом типа 2:1, при взрыве которого замечено существенное недореагирование алюминия с водой, т.е. замечено большое количество всплывших непрореагировавших частиц.

Для исследования эффекта направленного действия неидеального взрыва разработано устройство, создающее в воде колонну из равномерно распределенных всплывающих пузырьков (см. рисунок 4а). Эксперименты проведены при трех различных значениях объемного содержания пузырьков в воде (см. таблицу 6). Режим 1 соответствует наименьшему возможному расходу, при котором происходит равномерное наполнение пузырьками колонны (см. рисунок 4б). Режимы 2 и 3 относятся к среднему и максимальному расходам

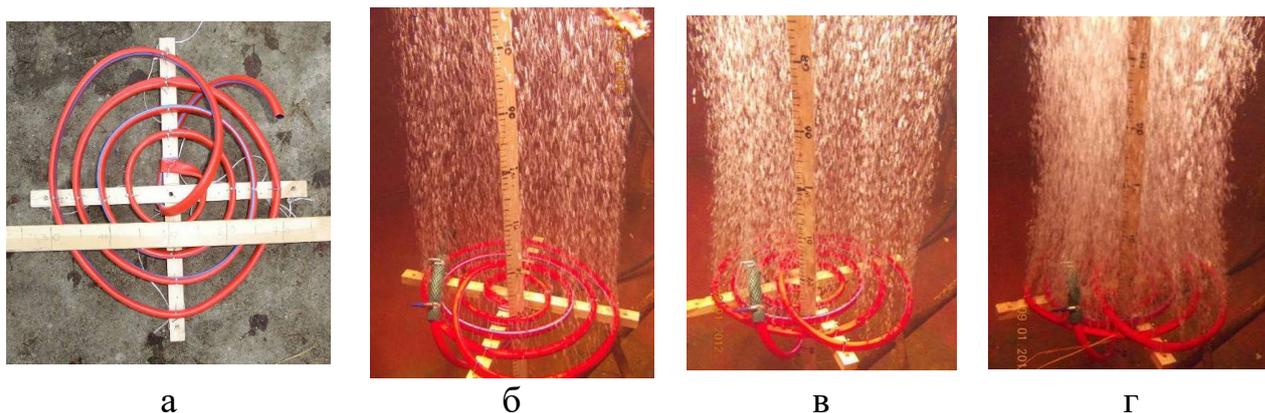


Рисунок 4. Генератор пузырьков: а – в выключенном состоянии; б-г – в рабочем состоянии. Режимы подачи газа: б – 1-й режим (наименьший расход); в – 2-й режим (средний расход); г – 3-й режим (наибольший расход)

Таблица 6. Параметры пузырьковой колонны при различных режимах подачи воздуха в малой емкости

Режим расхода воздуха	Расход воздуха, л/мин	Скорость всплытия пузырьков, м/с	Объемное содержание пузырьков в воде, об. %	Средний размер пузырьков, мм	Отношение диаметра пузырька к высоте
1	10	0.35	0.4	4 – 5	1.0 – 2.0
2	48	0.60	1.0	10	2.5 – 4.0
3	120	0.60	2.6	10	2.5 – 4.0

(см. рисунок 4в и 4г). Форма полученной пузырьковой колонны близка к цилиндрической, имеющей 40 см в диаметре у основания. Истечение происходит через щели с резкими краями, благодаря чему струи сразу же распадаются на отдельные пузырьки, размер которых почти не зависит от расхода воздуха. Пузырьки движутся по спиралевидным траекториям и редко сталкиваются. После слияния, когда происходит столкновение пузырьков, они практически сразу разделяются. Таким образом, на протяжении всей высоты пузырьковой колонны средний размер пузырька не меняется, и она остается однородной.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований подводных взрывов идеально и неидеально детонирующих зарядов в сплошной воде и в воде, содержащей пузырьки воздуха. Показан эффект направленного распространения взрывной волны вдоль заранее созданного пузырькового канала в сплошной воде от заряда к препятствию. Проведены референсные эксперименты с взрывами аммонита БЖВ, гексогена и тритонала в той же постановке, в которой исследуются неидеальные высокометаллизированные взрывчатые системы. В ходе эксперимента варьировалась глубина погружения заряда (135 см - 205 см).

Полученные сигналы датчиков давления и ускорения подвижного препятствия (импульсомера) использованы для определения максимальных уровней давления на обоих датчиках, удельной энергии гидроударной волны (ГУВ) e_s , максимальных значений кинетической энергии импульсомера, его перемещения и скорости. Для сравнения полученные данные приведены в таблице 7. Анализ результатов измерения параметров движения импульсомера показал, что процесс разгона происходит в две стадии во всех экспериментах. Первая стадия набора скорости связана с воздействием ГУВ. Вторая стадия является следствием действия импульса давления, рожденного в воде процессом расширения пузыря с ПД. В среднем донабор скорости за вторичной волной сжатия составляет 33-60 % от скорости, набранной при воздействии ведущей ГУВ.

Для определения влияния наличия колонны пузырьков на картину распространения волн сжатия в воде при взрыве 30 г аммонита 6ЖВ проведен опыт 2. Сигналы датчиков демонстрируют эффект демпфирования ГУВ и представляют собой череду периодических импульсов по которым сложно определить период пульсаций. Природа импульсов связана с многократными отражениями УВ в области, где присутствуют пузырьки. Анализ движения импурсомера показывает увеличение максимальной набранной им кинетической энергии, что свидетельствует об эффекте передачи кинетической энергии, сообщенной расширяющимися ПД гетерогенной среде, в заданном пузырьковой колонной направлении.

После получения реперных данных проведено исследование взрывов сверхбогатых неидеальных составов: сначала проведен взрыв смеси 1:1 в сплошной воде, затем в пузырьковой колонне в условиях, аналогичных опыту 2. При взрыве заряда 1:1 в сплошной воде амплитуда ГУВ увеличилась в 2.4 раза в сравнении с аммонитом, удельная энергия ГУВ также увеличилась в 1.4 раза. В ходе пульсаций пузыря с ПД наблюдаются вторичные вспышки. Набор скорости импурсомером интенсивнее, а его перемещение и кинетическая энергия также увеличиваются.

При взрыве состава 1:1 в воде с пузырьковой колонной (опыт 5) произошло увеличение длительности импульса сжатия в сравнении как со взрывом аммонита в пузырьковой колонне, так и смеси 1:1 в сплошной воде, а удельная энергия ГУВ достигла значения, полученного при взрывах тритонала и гексогена. Давление на фронте УВ оказалось ниже, чем при неидеальном взрыве в сплошной воде, но выше, чем при взрыве аммонита в воде с пузырьками. Эксперимент показал, что наличие пузырей в воде вокруг заряда увеличивает интенсивность дореагирования избыточного алюминия с водой, а колонна из пузырьков способствует перераспределению энергии взрыва вдоль нее, что приводит к направленному действию волн сжатия. При этом удельная энергия ГУВ повышается до уровня мощного ВВ.

Таблица 7. Сводная таблица результатов экспериментов

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Тип ВВ	6ЖВ	6ЖВ	6ЖВ	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1.5:1	1.5:1	2:1	2:1	1:1	1:1	Трито- нал	Гексо- ген	1:1	1:1
$P_{возд}$	-	2	-	-	2	3	3	1	1	3	1	3	1	1	-	-	-	1
А, м	0.75	0.75	1.40	0.75	0.75	0.75	1.45	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.65	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
Б, м	0.51	0.50	0.50	0.48	0.54	0.54	0.43	0.52	0.52	0.52	0.52	0.53	0.55	0.52	0.52	0.54	0.50	0.50
В, м	-	0.50↓	-	-	0.50↓	0.50↓	0.50↓	0.50↓	0.50↓	0.50↓	0.55↓	0.50↓	↔	0.20↑	-	-	-	0.50
Г, м	0.20	0.24	0.20	0.20	0.24	0.21	0.20	0.21	0.22	0.32	0.21	0.21	0.23	0.21	0.21	0.22	0.20	0.20
$P_{max D1}$, бар	148	117	286	355	227	107	122	193	131	104	142	91	210	222	178	304	221	175
$P_{max D2}$, бар	68	51	128	251	117	123	97	97	193	149	123	70	152	94	169	293	185	170
I_{1max} , мбар·с	45	33	6	43	56	46	29	35	49	47	44	4	56	51	30	54	57	62
I_{2max} , мбар·с	25	23	12	31	44	37	24	13	2	23	21	3	21	28	17	28	30	52
e_s , МДж/кг	0.64	0.26	0.68	0.90	0.97	1.34	0.70	0.98	0.92	0.84	0.66	0.67	1.02	1.14	0.39	1.10	1.21	1.16
V_{1max} , м/с	1.02	1.25	0.52	1.10	1.49	1.80	1.34	1.84	1.92	1.27	1.68	1.22	4.08	2.05	0.70	1.20	1.34	1.17
V_{2max} , м/с	1.47	1.68	1.00	1.52	2.13	2.44	1.47	2.55	2.26	1.83	1.97	1.92	3.90	2.59	1.12	1.59	1.91	2.06
E_{kmax} , Дж	220	290	102	236	605	461	222	663	513	369	389	341	1713	680	132	264	385	427

Примечание: $P_{возд}$ – режим подачи воздуха в колонну пузырьков, e_s – удельная энергия ГУВ, E_{kmax} – максимальная кинетическая энергия, V_{1max} – максимальная скорость импульсомера на первой стадии, V_{2max} – максимальная скорость импульсомера на второй стадии, ↓ – генератор пузырьков расположен под зарядом, ↔ – генератор пузырьков расположен на уровне заряда. А, Б, В, Г – расстояния, указанные на рисунке 2

Для ответа на вопрос о значении длины пузырьковой колонны проведены сравнительные эксперименты, в которых состав 1:1 был взорван на различных глубинах (опыты 6 и 7). Записи датчиков были похожи и позволили сделать вывод о воспроизводимости процессов вблизи заряда. При более длинной колонне запись ГУВ практически отсутствует – волна практически полностью поглощена пузырьковой средой. При этом длительность фазы волн сжатия, рожденных при дореагировании избыточного алюминия, вырастает более чем в два раза, а реакция алюминия с водой продолжается дольше, однако действие на импульсомер заметно снижается по всем параметрам. Это связано с большим поглощением энергии пузырьковой средой. Опыт позволяет сделать несколько важных выводов: оптимальное взаиморасположение элементов установки соответствует опыту 6; увеличение запаса времени до момента разгрузки приводит к повышению полноты реакции алюминия, а значит, к усилению механического действия волны сжатия; при большом объемном содержании пузырей в воде происходит поглощение ГУВ.

Проведено исследование влияния объемного содержания пузырьков в колонне на параметры волны сжатия и ее действие на препятствие. Сопоставление амплитуд и форм сигналов датчиков давления, соответствующих импульсам сжатия за ГУВ показывает, что при наличии пузырьковой колонны длительность цепи волн сжатия выше на обоих датчиках. Наиболее интенсивный сигнал вблизи импульсомера зарегистрирован в случае использования колонны пузырей среднего размера, что также указывает на оптимум условий для реакции в этом случае. Сравнение экспериментов, в которых заряд имеет больший избыток алюминия (опыты 9 и 10, а также 11 и 12) показывает, что в случае более низкого содержания воздуха в колонне, импульс на нижнем датчике для обоих составов выше, а на верхнем – ниже. Та же картина видна и для экспериментов со смесью 1:1, однако при режиме подачи 2 импульс волны сжатия является максимальным. Снижение импульса на нижнем датчике в случае 3-го режима генерации пузырьков объясняется более высоким поглощением энергии в области, где объемное содержание воздуха в воде выше. На верхнем датчике он в большей

степени зависит от движения жидкости за ГУВ, поэтому из-за направленного движения в сторону второго датчика, принимая во внимание большую сжимаемость среды в режиме 3, в процессе торможения на торце препятствия волна сжатия имеет больший импульс. Это наблюдение также подтверждает наличие направленного эффекта действия взрыва. Параметры движения импульсомера, соответствующие наибольшему механическому действию взрыва, в испытаниях со смесью 1:1 (опыты 5 - 8) зарегистрированы в опыте 8, где колонна была с мелкими пузырями, в то время как оптимум по параметрам волн сжатия приходится на эксперимент со средним размером пузырьков в колонне (режим 2). При низком объемном содержании газа в воде разгрузка по пузырьковому слою на боковых стенках импульсомера наступает позже, что также способствует более интенсивному его разгону. В опытах с повышенным содержанием алюминия в заряде (смеси 1.5:1 и 2:1) при движении импульсомера наблюдаются те же закономерности, что и для составов 1:1.

Проведены исследования влияния избытка алюминия в составе заряда на параметры волн сжатия в воде. Поставлены две группы экспериментов с различным содержанием алюминия (1:1, 1.5:1 и 2:1). Опыт 8, 9 и 11 – неидеальные заряды, взорванные внутри гетерогенной колонны «вода + пузыри» с наименьшей объемной долей воздуха (режим 1). Опыт 6, 10 и 12 – те же заряды, но взорванные внутри пузырьковой колонны образованной при 3-ем режиме генерации. Результаты измерений показывают, что параметры взрывных волн не имеют монотонных зависимостей по мере обогащения смесей (см. таблицу 7). На датчике, расположенном рядом с препятствием, импульс падает при обогащении состава. Во всех опытах импульс на датчике D_2 незначительно снижается в сравнении с датчиком D_1 . Увеличение Al в составе проявляет себя в монотонном росте полного импульса I_{2max} . Это означает, что избыточный алюминий сгорает достаточно поздно на стадии дореагирования с водой. Другая картина наблюдается, когда сравниваются данные о движении импульсомера. Здесь обогащение смеси приводит к монотонному снижению по всем параметрам. Более длительное догорание алюминия за фронтом ГУВ не

приводит к увеличению параметров движения импульсомера, однако заметно, что в случае более богатых составов поздние механические эффекты взрыва, не учитываемые при измерениях (вертикальное перемещение емкости, расплескивание, деформация и растяжение конструкций) заметно сильнее. Из опытов стало ясно, что особой выгоды на начальном этапе воздействия взрыва увеличение содержания алюминия не несет, и наиболее оптимальной по подавляющему большинству параметров оказывается смесь 1:1. Во второй группе экспериментов с наибольшим содержанием воздуха в пузырьковой колонне максимальное давление на нижнем датчике уменьшается по мере обогащения смеси. Давление на верхнем датчике и импульс на нижнем имеют максимум при взрыве заряда с составом 1.5:1. Параметры движения импульсомера снижаются с увеличением содержания алюминия в смеси.

Кроме генератора пузырьков был также опробован альтернативный способ генерации гетерогенного канала от заряда к цели: взрыв отрезка детонационного шнура перед иницированием заряда (опыт 17). Показано, что подобный способ также обеспечивает направленное действие взрыва и при соответствующей оптимизации может быть использован для организации направленного энерговыделения при подводном взрыве.

Наличие гетерогенной среды под зарядом может вызвать нежелательную разгрузку и ослабление, как начальной стадии разгона гетерогенной среды, так и снижение параметров формирующейся волны сжатия. Поэтому проведены два дополнительных эксперимента, в которых генератор пузырьков располагается на уровне заряда и несколько выше него. Опыт 13 наглядно демонстрирует, что оптимальным относительно гетерогенной колонны расположением заряда является его размещение у сплошной воды, т.е. вблизи генератора пузырьков.

В заключительной главе диссертации также представлены эксперименты, в которых было увеличено временное окно для регистрации давления путем помещения мишени на дно бассейна (см. рисунок 2б). При этом колонна пузырьков отсекалась на уровне заряда специальным отражателем. Полученные записи продемонстрировали те же закономерности что и для опытов с верхним

расположением мишени относительно заряда. На записи, полученной на датчике в пузырьковой колонне на расстоянии 1.7 м от заряда, наблюдается плавный, высокий и длительный импульс. На записи, полученной в сплошной воде на расстоянии 0.5 м от заряда, отчетливо видны множественные резкие импульсы давления, связанные с многократными отражениями ГУВ при прохождении через пузырьковую колонну в поперечном направлении. Такое же поведение наблюдается во всех экспериментах, где алюминизированные заряды взрываются внутри пузырьковой среды. Подобный эффект наблюдается даже при низком содержании пузырьков в воде (режим 1).

Проведена проверка возможности масштабировать эффект направленного подводного взрыва. Для этого в более крупном бассейне, который представлял собой прямоугольную яму 8x8 м и глубиной 4 м, выкопанную в песке и гидроизолированную полиэтиленовой пленкой, были проведены сравнительные взрывы зарядов на порядок большей массы: ТНТ в сплошной воде, и состава 1:1 (250 г) в пузырьковой колонне от мишени на дне до заряда на середине глубины. Опыты показали значительный эффект направленного действия во время взрыва состава 1:1 в сравнении с взрывом тротила в воде без пузырей при прочих равных условиях. Уровень давления в направлении пузырьковой колонны превысил давление на боковом датчике более чем в два раза. После нескольких экспериментов с зарядами массой 250 г бассейн разрушается.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Экспериментально получены детонационные характеристики высокометаллизированных смесевых ВВ, в том числе зависимости скоростей детонации от состава заряда и типа оболочки. На основе этих данных уточнена численная модель неидеальной детонации, с помощью которой установлен механизм ее распространения. Показано, что для распространения детонации в сильно забалластированном металлическим горючим составе необходима добавка жидкого взрывчатого вещества.

2. Предложены три рецептуры смесевых ВВ с различным избытком металлического горючего для проведения подводных взрывов с заданными характеристиками. Проведены взрывные испытания новых составов в воде. Получены энергетические и динамические характеристики подводных взрывов. Установлено, что изменение долей количества избыточного металла и добавки ЖВВ в составе новых энергетических материалов позволяют оптимизировать подводный взрыв за счет управления ударноволновой и пульсационной составляющими энергии.

3. Разработан новый метод организации подводного взрыва высокометаллизированных ВВ, позволяющий вовлечь в реакцию с водой весь избыточный алюминий в их составе. Метод предполагает инициирование заряда в специально подготовленной пузырьковой среде с заданными формой и плотностью. Обнаружено взаимное влияние характеристик пузырьковой среды и состава заряда на параметры и направление распространения высокоскоростных течений и волн сжатия. Экспериментально реализован сценарий направленного подводного взрыва, при котором волны сжатия и течения распространяются в специально подготовленном пузырьковом канале от заряда к цели. Продемонстрирован эффект масштабирования нового типа зарядов и способа их взрывания.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Komissarov P.V., Borisov A.A., Basakina S.S., Lavrov V.V., Sokolov G.N. Explosion of aluminized mixtures in bubble column as a method of underwater compression wave enhancement // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. — V. 1147. — P. 12–36.

2. Комиссаров П.В., Борисов А.А., Басакина С.С., Лавров В.В. Усиление взрывной волны подводного взрыва металлизированного заряда в направлении пузырькового канала в сплошной воде // Химическая физика. — 2019. — Т. 38, № 8. — С. 12–23.

3. Комиссаров П.В., Сулимов А.А. Ермолаев Б.С., Басакина С.С., Лавров В.В., Точилин С.Н., Храповский В.Е. Особенности инициирования и распространения низкоскоростной детонации в высокоплотных зарядах на основе смесей перхлората аммония с горючими добавками // Химическая физика. — 2020. — Т. 39, № 8. — С. 21–27.

4. Komissarov P.V., Basakina S.S., Lavrov V.V., Sokolov G.N. Detonation properties of explosive proppants based on slurry nitromethane plus ammonium perchlorate mixtures // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — V. 1787. — 012019: 1–10.

5. Ермолаев Б.С., Комиссаров П.В., Басакина С.С., Лавров В.В. Оценка скоростей экзотермических реакций при неидеальной детонации тройных смесей нитрометан / перхлорат аммония / алюминий // Химическая физика. — 2023. — Т. 42, № 9. — С. 63–73.