

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ХИМИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ
ИМ. Н.Н. СЕМЁНОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

УДК 534.222

На правах рукописи

БАСАКИНА СВЕТЛАНА СЕРГЕЕВНА

**ГИДРОДИНАМИКА НАПРАВЛЕННОГО ПОДВОДНОГО ВЗРЫВА
НЕИДЕАЛЬНО ДЕТОНИРУЮЩИХ
ВЫСОКОМЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ СОСТАВОВ**

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

диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук
Комиссаров Павел Владимирович

Москва 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР.....	10
1.1 Подводные взрывы.....	10
1.2 Подводные взрывы высокометаллизированных ВВ	13
1.2.1 Сравнение различных металлов как горючего	13
1.2.2 Горение металлических частиц с водой и водяным паром	19
1.2.3 Алюминий как добавка в ВВ для подводных взрывов	25
1.3 Волны сжатия в барботированных средах	28
1.4 Механизмы взаимодействия металла с водой в пузырьковом канале.....	30
1.5 Моделирование детонационных процессов в многокомпонентных смесевых металлизированных составах	37
ГЛАВА 2. ДЕТОНАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОМЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ СОСТАВОВ	39
2.1 Математическое моделирование и расчет скоростей детонации.....	43
2.1.1 Информация о математической модели и входных константах, которые применялись в расчетах.....	43
2.2 Результаты моделирования	53
2.2.1 Смеси нитрометана с перхлоратом аммония	53
2.2.2 Трехкомпонентные смеси НМ/ПХА/Al	57
2.2.3 Расчет теплоты взрыва тройных составов.....	63
ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ НЕИДЕАЛЬНОГО ПОДВОДНОГО ВЗРЫВА	64
3.1 Пристрелочные эксперименты	64
3.1.1 Взрывы идеального и неидеального зарядов в малой емкости.....	64
3.2 Выбор оптимальных значений глубины и массы заряда	68
3.3 Оборудование и методика для измерений параметров волн сжатия от неидеальных взрывов в воде	73
3.4 Методика измерения действия волны сжатия на препятствие.....	78
3.5 Измерительная система	81
3.6 Методика обработки сигналов датчиков	81
3.7 Характеризация пузырьковой колонны	85
3.8 Генератор пузырьковой колонны	87

3.9 Режимы подачи газа.....	88
3.10 Исследование особенностей пузырьковой колонны	89
3.11 Пузырьковый экран.....	95
ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК АЛЮМИНИЯ И СВОЙСТВ ПУЗЫРЬКОВОГО КАНАЛА НА ПАРАМЕТРЫ ПОДВОДНОГО ВЗРЫВА	97
4.1 Взрыв идеального ВВ в воде.....	97
4.1.1 Взрыв в сплошной воде	98
4.1.2 Взрыв в барботированной воде	102
4.2 Взрыв металлизированного ВВ в воде.....	104
4.2.1 Взрыв высокометаллизированного заряда в сплошной воде	104
4.2.2 Взрыв высокометаллизированного состава в барботированной воде..	105
4.3 Влияние длины пузырьковой колонны.....	109
4.4 Влияние плотности пузырьковой колонны на параметры взрыва.....	111
4.5 Влияние количества алюминия в составе заряда на параметры волн сжатия в воде	114
4.6 Влияние положения генератора пузырьковой колонны относительно заряда	116
4.7 Другие способы усиления действия взрыва на препятствие.....	119
4.8 Параметры волн сжатия при действии направленного неидеального подводного взрыва на неподвижное препятствие	121
4.9 Проверка масштабирования эффекта направленного действия взрыва.....	123
4.10 Оценка результатов исследования	125
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ	130
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	131

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

BLPG – bulk-loaded liquid propellant gun, перевод: баллистическая установка с жидким метательным веществом безгильзового заряжания

HTPB – hydroxyl-terminated polybutadiene as binder, перевод: полибутадиен с концевыми гидроксильными группами

TDI – toluene diisocyanate, перевод: толуол-2,4-диизоцианат

SEM – scanning electron microscopy, перевод: сканирующая электронная микроскопия

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

ВВ – взрывчатое вещество

ГРД – гидрореактивный двигатель

ГУВ – гидроударная волна

ДШ – детонационный шнур

ЖВВ – жидкое взрывчатое вещество

КПД – коэффициент полезного действия

МКВВ – металлизированное конденсированное взрывчатое вещество

НМ – нитрометан

ПАВ – поверхностно-активное вещество

ПГД – переход горения в детонацию

ПД – продукты детонации

ПП – полипропилен

ПТ – полость Тейлора

ПХА – перхлорат аммония

ПНД – полиэтилен низкого давления марки ПЭ100

ТНТ – тринитротолуол

ТЭН – тетранитропентаэритрит

УВ – ударная волна

ВВЕДЕНИЕ

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 инициировании 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 сейсмозондировка, 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.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1 Подводные взрывы

В настоящее время наблюдается растущий интерес к подводным взрывам не только в военных целях, но и для решения ряда технических задач: для углубления каналов, разрушения препятствий, резки и штамповки листового материала, устранения ледовых заторов, проведения разрывов нефтеносных пластов для увеличения дебита скважин при подводной добыче полезных ископаемых.

При инициировании заряда под водой по нему начинает распространяться детонационная волна, которая при выходе на поверхность раздела ВВ - вода образует в последней ГУВ [1]. Вслед за этим начинают расширяться и толкать воду вперед ПД. Расширение газового пузыря с ПД продолжается в течение сравнительно продолжительного промежутка времени и прекращается, когда давление внутри него сравнивается с гидростатическим давлением. Однако движение стенок пузыря продолжается далее из-за инерции воды. Вследствие этого давление газа оказывается ниже равновесного значения, складывающегося из атмосферного и гидростатического давлений, что приводит к прекращению расходящегося движения воды и последующему сжатию поверхности пузыря. Сходящееся движение границ пузыря продолжается до тех пор, пока давление в нем не уравнивает инерцию радиального потока воды. В результате, благодаря инерции воды и упругости газа, возникает колебательное движение газовой полости: пузырь совершает последовательные циклы расширения и сжатия. Может происходить до десяти и более таких колебаний. Таким образом, кроме основной ударной волны (УВ), в воде распространяются волны давления, вызванные пульсациями газового пузыря. Максимальное давление первой пульсации не превышает 10-20 % от давления УВ, однако длительность действия этого давления значительно дольше действия давления ГУВ, поэтому их импульсы сравнимы по величине.

Основными параметрами подводного взрыва являются: пиковое значение давления, импульс и энергия ГУВ, а также энергия пульсации. Однако не всегда есть возможность точно определить пиковое давление на фронте, поэтому во многих случаях эффективность ГУВ оценивается с помощью импульса, который определяется как интеграл давления по времени:

$$I(t) = \int_0^t (P(t) - P_0) dt, \quad (1)$$

где P_0 – гидростатическое давление окружающей среды. Однако оно значительно ниже давления на фронте ГУВ, и поэтому в уравнении, как правило, не учитывается.

Полная энергия взрыва конденсированного ВВ в воде может быть определена как сумма энергии ГУВ и энергии пульсаций газового пузыря [1]. Причем полученная сумма этих энергий обычно является величиной, близкой к величине теплоты взрыва ВВ. Обычно энергию ударной волны e_s вычисляют по записям давления путем интегрирования следующим образом:

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

где R – расстояние между датчиком давления и зарядом, m – масса заряда, ρ_w – плотность воды на глубине размещения заряда, c_w – скорость звука в воде на глубине размещения заряда с учетом температуры окружающей воды в месте размещения, τ – постоянная времени процесса, т.е. время, в течение которого давление на датчике снизилось от максимума (фронта) до величины $P_m/e \approx 0.37 P_m$, P – зависимость давления от времени (см. рисунок 1). Величина верхнего предела интегрирования 6.7τ была выбрана Коулом [1] на основе множества экспериментов.

В свою очередь, значение энергии пульсации e_b определяется по формуле, представленной в [2, 3]:

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

где $K_1 = 1.135 \rho_w^{1/2} / P_h^{5/6}$, где P_h – сумма атмосферного и гидростатического давлений, ρ_w – плотность воды на измеряемой глубине, P_{hm} – сумма нормального атмосферного давления на поверхности водоема и гидростатического давления на глубине размещения заряда, t_b – период пульсации, коэффициент C определяется как $C=b/a^2$, где a и b – константы, которые находятся в результате процедуры калибровки водоема [2-4], где проводятся измерения периодов пульсаций для различных масс ТНТ. По полученным данным строится зависимость вида

$$t_b = a \cdot m^{1/3} + b \cdot m^{2/3}, \quad (4)$$

по которой определяются искомые константы.

Стоит отметить, что приведенные формулы справедливы для зарядов различной формы, однако в этих случаях нужно учитывать место расположения датчика относительно заряда. Например, в случае взрыва цилиндрического или линейного заряда энергия ударной волны имеет более высокие значения в направлениях максимального начального давления, которое соответствует середине заряда.

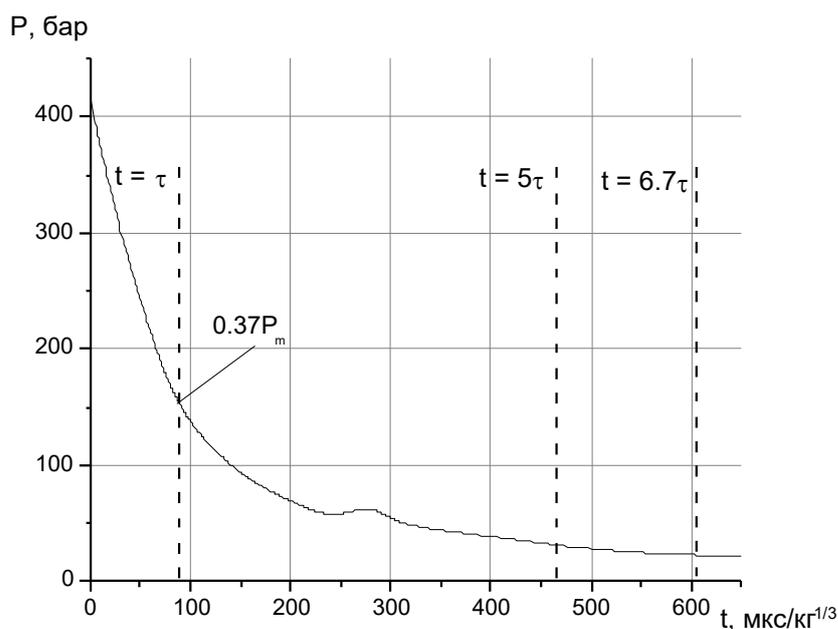


Рисунок 1. Типичная кривая зависимости давления от времени в воде для сферического заряда пентолита [1]

Применение идеальных ВВ, таких как тротил или гексоген, не всегда эффективно, так как при подводном взрыве они дают высокие амплитуды взрывных волн при коротких длительностях, что приводит к сильным локальным разрушениям и нежелательно для использования в промышленных установках. Поэтому для этих случаев выгодно использовать ВВ с длительным энерговыделением. Повышения длительности можно достичь, применяя ВВ, включающие в себя компоненты, способные дореагировать с окружающей водой, например, металлы.

1.2 Подводные взрывы высокометаллизированных ВВ

Одним из наиболее перспективных путей повышения энергетики ВВ считается включение в реакцию окислителя, содержащегося в среде, в которой производится взрыв. Для этого во взрывчатую смесь добавляют металлические частицы, которые могут дореагировать с окружающей окислительной средой. Еще в конце XIX века металлы (в том числе Mg, Zn и Al) стали использоваться в качестве компонентов ВВ.

1.2.1 Сравнение различных металлов как горючего

Высокометаллизированные энергетические материалы используются достаточно давно в качестве гидрореагирующих ракетных топлив. В качестве металлического горючего в основном рассматриваются алюминий, магний, бор, цирконий, бериллий и литий. Подробный сравнительный анализ свойств этих металлических компонентов топлива проведен в работе [5]. Анализ показал, что одной из проблем использования алюминия является сложность зажигания высокоалюминизированных составов. Бор, обладая более высокой, чем у алюминия и магния, теплотой сгорания, также имеет серьезные проблемы с зажиганием ввиду высоких температур плавления и кипения (2176°C и 3657°C). Авторы также указывают на проблему образования окиси бора B_2O_3 на поверхности частиц вследствие его высокой активности. Бериллий является перспективным топливом с термодинамической точки зрения, однако токсичность продуктов его горения (в основном BeO) делает его использование опасным для

человека и окружающей среды. Использование циркония также бесперспективно в силу его дороговизны, чувствительности к электростатическим разрядам и пирофорным свойствам. Магний, при его низких температурах плавления и кипения, имеет низкое стехиометрическое отношение воздуха к топливу – 3.29 по сравнению с алюминием и бором, для которых оно равно 4.44 и 11.12 соответственно. Кроме того, смесь Mg/H_2O обладает меньшей плотностью энергии, чем Al/H_2O . В дополнение температура плавления MgO ($2801^\circ C$) выше, чем у алюминия ($2044^\circ C$), что также может вызвать трудности при воспламенении. Однако магний остается перспективным металлическим горючим для реакции его избыточного количества в составе с водой, учитывая высокую энергетику реакции ($\Delta H_r = -354$ кДж/моль). В работе [6] было исследовано горение частиц магния в потоке водяного пара с различной температурой ($500^\circ C$, $600^\circ C$, и $700^\circ C$). При температуре в $700^\circ C$ реакция начинает идти интенсивно, однако показано, что для достижения высоких скоростей горения частицы магния требуют механоактивации. В подтверждение этого результата в работе [7] была представлена экспериментально верифицированная упрощенная модель горения частицы магния в водяном паре. В рамках этой модели были сделаны допущения о том, что поверхность пламени бесконечно тонкая, а само пламя сферически симметричное. При горении происходит мгновенная равномерная конденсация окисла на частицу, а фазовый переход жидкость газ на поверхности является равновесным (описывается уравнением Клапейрона - Клаузиуса). Такая упрощенная модель позволяет провести предиктивное моделирование и добиться близких к экспериментальным результатов в оценке параметров горения: распределения температур вокруг частицы, изменения радиуса частицы, скорости испарения.

Учитывая все вышеназванные факторы, можно сделать вывод, что алюминий является наиболее выгодным компонентом для использования в составе, особенно если учитывать его, уступающую только бору, высокую удельную теплоту сгорания с водой (49 кДж/см³). Не смотря на то, что магний имеет температуру кипения ниже, чем у алюминия, это не дает существенного преимущества для

стабилизации фронта горения [8]. Щелочные гидрореагирующие металлы могут также быть использованы во взрывчатом составе, особенно в дисперсной форме, при условии, что они будут защищены пассивирующим покрытием от взаимодействия с влажным воздухом. В работе [9] было проведено обобщение имеющихся данных о горении лития, в том числе в форме мелких частиц в различных окислительных средах. Было показано, что скорости реакции частиц лития ниже, чем у алюминия в той же окислительной среде. Однако более низкие температуры воспламенения лития с водой позволяют рассматривать его в качестве активирующей добавки, снижающей требования к воспламенителю. Кроме лития в качестве компонента состава улучшающего воспламеняемость смеси алюминия и воды, при расширении ПД, целесообразно использовать и другие материалы. Так, например, в [10-15] был проведен ряд исследований энергетических материалов на основе порошка алюминия с повышенной реакционной способностью. Преимущественно это были механоактивированные композиты на основе Al и Li с порошками Mg, Ti, Ni, Co в качестве добавок. Подобные композиты обеспечивают более быстрое сгорание за счет сниженных задержек воспламенения и, в ряде случаев, также более низкую по сравнению со смесями алюминия и воды температуру воспламенения.

Высокоалюминизированные гидрореагирующие топлива были рассмотрены авторами [16], где было исследовано горение перспективных гидрореагирующих составов типа металл + ПХА + НТРВ/TDI. В качестве металлического горючего использовались как порошки алюминия различной дисперсности, так и его сплавы с магнием. При этом содержание металла в смеси составляло до 60 вес. %. Следует отметить, что используемые алюмомагниевого сплава 50/50 и механосинтезированный сплав b-AM были получены перемалыванием порошков в шаровой мельнице. Поэтому наблюдалось существенное различие формы частиц порошков. На рисунке 2а. показаны изображения частиц, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM). Видно, что частицы b-AM имеют неправильную форму и существенно развитую поверхность в отличие от исходных частиц.

В работе [16] эксперименты проводились посредством двухстадийного сжигания – сначала собственно порохового состава, а затем продуктов его сгорания в камере с перегретым паром. Для определения полноты реакции проводили химический анализ остатков. В результате оказалось, что наибольшая эффективность горения с паром была у механической смеси Al с Mg (b-AM). Это объясняется не только большей удельной поверхностью, но и формированием в ходе реакции на поверхности частиц слоя Al_2MgO_4 , который, предположительно, не оказывает сопротивления окислению и горению. Также важным результатом является более высокая эффективность реакции Al в присутствии магния (в составах с AM и b-AM). Авторами [17] для составов типа Al + ПХА + HRBP в качестве катализатора горения был использован хромит меди ($Cu_2Cr_2O_5$), существенно повышающий скорость сгорания алюминия. Подобный эффект для механосинтезированного сплава Al/Ti в воздухе показан в [15]. Так, добавка Ti в 10 вес.% существенно снижала температуру воспламенения частиц, что связано с уравниванием метастабильных фаз, образующихся при перемалывании порошков при нагреве. Кроме того, как видно на SEM-изображении (см. рисунок 2б), подобный механический сплав имеет развитую поверхность.

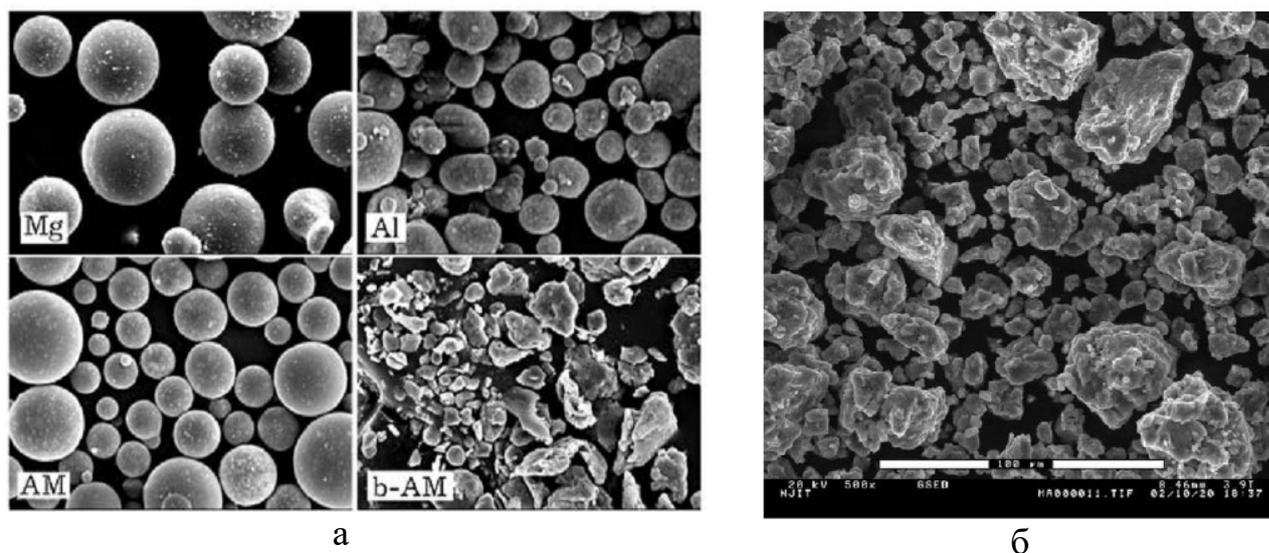


Рисунок 2. SEM - изображения: а – порошков, исследованных в [16], б – механического сплава Al-Ti [15]

Подтверждением существенного влияния механообработки на скорость реагирования магния с водой являются результаты работы [18]. Порошок магния размалывался один час в шаровых мельницах со стальными шарами в аргоновой атмосфере в присутствии 0.5 вес. % стеариновой кислоты, как отдельно, так и с добавками 5 вес. % Ni и Co. Затем полученный порошок подвергался гидролизу, при котором измерялся удельный выход водорода в различные моменты времени от начала реакции.

Как видно из таблицы 1, помол существенно увеличивает удельную поверхность порошка, а скорость реакции увеличивается более чем на порядок. Выход водорода, а значит и полнота реакции в интервале измерений также увеличивается на несколько порядков. Следует отметить, что добавки небольших количеств Ni и Co хотя и несколько снижают количество произведенного водорода, но существенно увеличивают активность состава в первом интервале. Различным методам получения механоактивированных композитов на основе Al свойственно широкое распределение частиц по размерам, так как из-за ковкости Al при размоле в шаровых мельницах он склонен к образованию агломератов.

Авторы [19] продемонстрировали результаты двухстадийного размола, при котором на первой стадии добивались хорошего перемешивания и механического сплавления компонентов композита, а на второй в присутствии йода в качестве контролирующего агента происходило контролируемое дробление до фракций нужного размера.

Таблица 1. Результаты для порошка Mg и его сплавов [18]

Вид порошка		Mg	Молотый порошок, вес. %		
			Mg	95 Mg + 5 Ni	95 Mg+ 5 Co
Удельная площадь поверхности, м ² /г		0.26	0.724	0.888	0.917
Скорость реакции мл/(мин·г)	0-1 мин	0	182	225	575
	1-5 мин	0.2	111	143	71
	5-10 мин	0.6	56	10.2	0
Полное время реакции, мин		120	10	8	5
Количество образовавшегося H ₂ , мл		7.0	906	859	867
Доля выхода продуктов реакции, %		0.75	97.1	96.81	97.82

Эксперименты по сжиганию таких композитов на воздухе продемонстрировали существенно более низкие температуры воспламенения (586-768°C), чем порошок чистого алюминия, который воспламеняется при 1576°C, а времена горения частиц снижаются.

Если не принимать во внимание сравнительно высокую цену, то хорошим кандидатом на гидрореагирующее горючее в составе высокоалюминимизированного ВВ является активно исследуемый в последнее время класс энергетических материалов, основанных на нанотермитах и нанокompозитах на основе нанотермитов. Так, например, в [8] было показано, что составы на основе CuO/Al способны поддерживать распространение реакционного фронта со скоростями порядка 700 м/с. Нанокompозиты на основе нанотермитов, содержащие 30-70 % наночастиц нитрата аммония, гексогена или Cl-20 способны поддерживать распространение реакционного фронта со скоростями на уровне до 4000 м/с. Следует рассмотреть возможность распространения фронта с более низкими скоростями в составах с более крупными частицами. Подобные составы были бы перспективны для интенсификации реакции разогрева металлического порошкообразного горючего и последующего его разброса в случае использования зарядов с «активной оболочкой», т.е. зарядов, окруженных слоем порошка металла с небольшой добавкой окислителя, который не способен к детонации но повышает общее количество прореагировавшего с водой металла при взрыве и последующем расширении ПД. Дополнительное диспергирование частиц в такой «активной оболочке» в этом случае будет происходить, в том числе, за счет образующихся при горении композитных составов газов.

В работе [20] сообщается о том, что добавки пористого кремния (p-Si) самого по себе являющегося энергетическим материалом с объемной удельной энергией, сравнимой с таковой у Al, и высокой реакционной способностью существенно облегчают воспламенение и ускоряют горение алюминизированных составов. Авторы сообщают, что изменение добавки p-Si в алюминизированных составах позволяет управлять скоростью воспламенения и горения составов на основе

смесей Al/CuO в широких пределах. Однако следует проверить сохранится ли этот эффект в высокоалюминизированных составах, т.к. именно составы на основе композитов Al и пористого силикона будут оптимально подходить для гидрореагирующего материала в составе высокометаллизированных зарядов в широком диапазоне скоростей реакции.

1.2.2 Горение металлических частиц с водой и водяным паром

Одним из основных факторов общей скорости горения высокоалюминизированных составов является время сгорания частиц алюминия. В обзоре [21] было собрано и проанализировано большинство известных работ, в том числе обширные данные Бекстэда [22] и более поздние данные [23, 24]. Также была представлена обобщенная теория горения нано- и микропорошков алюминия, в которой, в зависимости от размера, процесс окисления делится на 3-4 стадии. По мнению авторов [21], на первом этапе происходит нагрев до температуры плавления внутреннего алюминиевого ядра. При этом тепло- и массоперенос внутри частиц, а также тепло- и массоперенос на поверхности контакта алюминия и газа являются ключевыми процессами на первой стадии окисления. Второй этап начинается с плавления внутренних слоев, что приводит к повышению давления, инициирующему движение расплавленного металла наружу за счет его проникновения сквозь поверхностные трещины в окисном слое. Плавление сопровождается фазовыми превращениями в оксидном слое. Это приводит к его разрушению под действием растягивающих напряжений и последующему воспламенению. В случае, если оксидный слой является гибким, а давление – достаточно низким, движение расплавленного алюминия через слой окиси становится ключевым процессом окисления. В зависимости от коэффициентов диффузии молекул алюминия и окислителя реакции протекают на границе ядро-оболочка или на внешней поверхности. Авторы также утверждают, что полиморфные фазовые превращения (процессы перехода из одной кристаллической модификации в другую) могут способствовать воспламенению наноразмерного алюминия за счет создания брешей в оксидном слое. Для

микронного алюминия воспламенение по указанному механизму невозможно из-за его большей объемной теплоемкости. На третьем этапе горения происходят самоподдерживающиеся гетерогенные реакции металла с окислительными газами. Также было установлено, что время горения наноалюминия слабо зависит от размера частиц, но сильно зависит от давления и температуры окружающего газа. Авторы пришли к выводу, что скорость горения в этом случае контролируется химической кинетикой, а не процессами массовой диффузии горючего в окислитель. Для более крупного микронного алюминия плавление оксидного слоя приводило к инициированию газофазных или поверхностных реакций и, как результат, к четвертому этапу горения. Скорость горения при этом контролировалась массопереносом.

Статистические исследования зависимости времен горения порошков Al и Mg размером 1-10 мкм от параметров окислительной среды, водяного пара, проведены в работе [7]. Результаты исследования представлены на рисунках 3 и 4. Показано, что в законе горения D^n по Бекстэду [22, 25]:

$$t_b = \frac{aD^n}{(C_{O_2} + 0.6C_{H_2O} + 0.22C_{CO_2})p^{0.1}T^{0.2}} \quad (5)$$

для частиц алюминия показатель степени n равен 0.68, а для магния 0.64 соответственно.

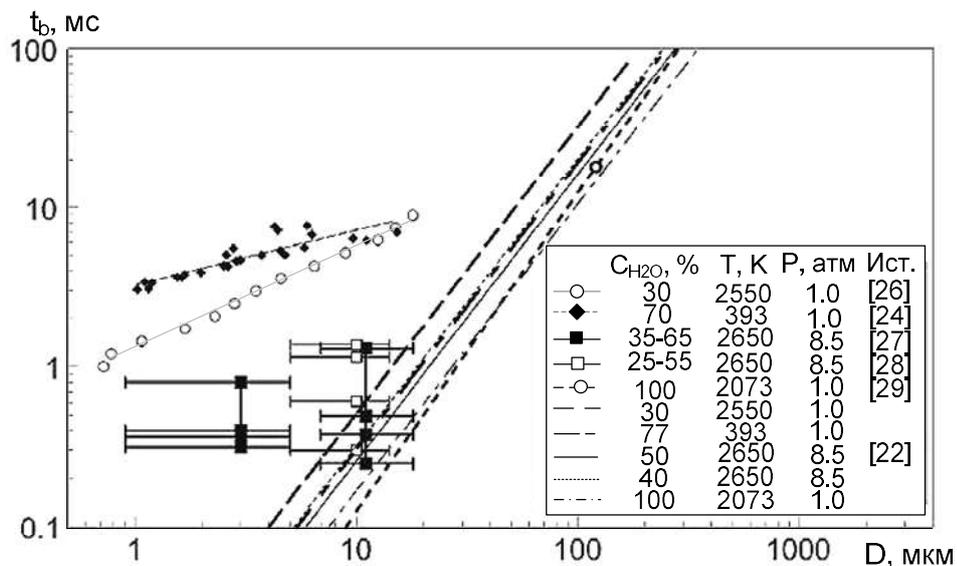


Рисунок 3. Зависимость времени горения от размера частиц [26] для порошков алюминия в сравнении с данными из других источников

Этот результат также наблюдался в [26]. Было установлено, что магний горит активнее. В случае же более крупных фракций (20-250 мкм) Бекстэдом был найден показатель $n=1.8$. На основе данных о временах горения чешуйчатого алюминиевого порошка марки ПАП-2, полученных ударноволновой методикой (воспламенение на торце трубы в неподвижной отраженной воздушной УВ [30, 31]), был рассчитан показатель степени $n=1.5$.

В работе [27] были обнаружены различия между данными Бекстэда и экспериментальными результатами измерения времен горения порошка Al в ударной трубе. На основе экспериментальных результатов была построена усредненная линия зависимости времен горения от размеров для частиц в диапазоне 3-11 мкм, сожженных в различных окислителях (O_2 , H_2O и CO_2) и при диапазоне давлений и температур в 4-25 атм и 26-2726°C соответственно. Авторы отметили значительное различие скоростей горения в зависимости от диаметров частиц, давления и типа окислителя. Значительная разница во временах горения была объяснена различными механизмами реакций.

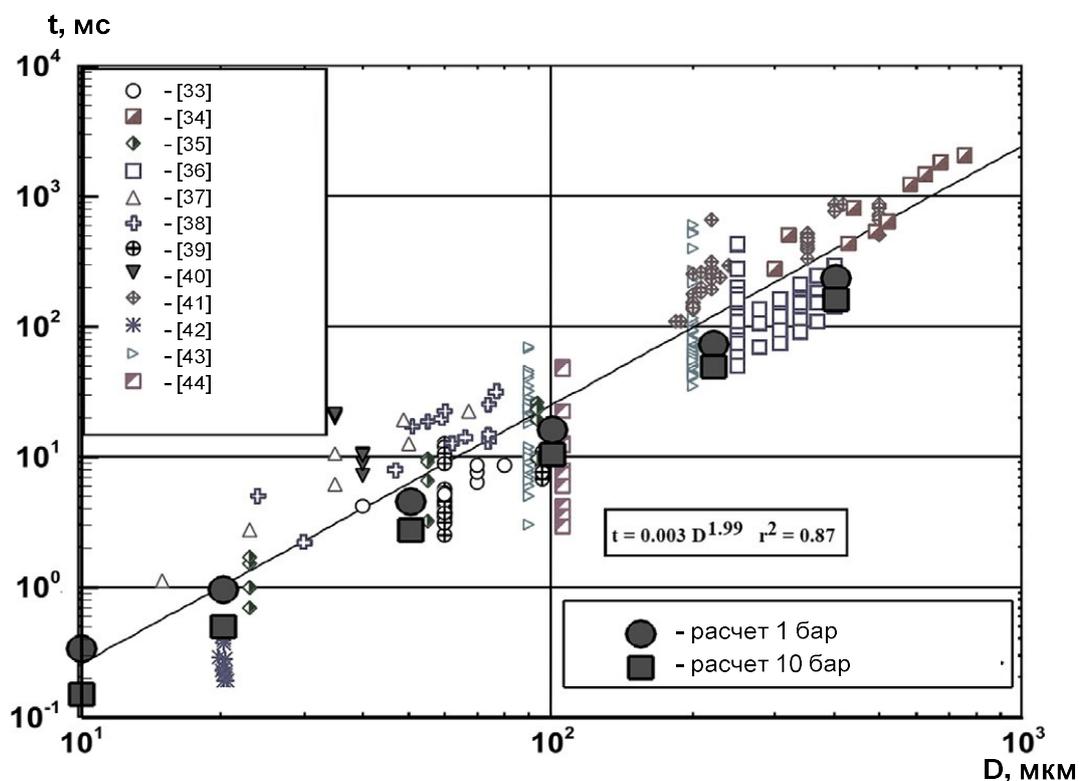


Рисунок 4. Время горения, рассчитанное в [32], на основе экспериментальных данных [25]. Результаты получены при условии, что $[O_2]/[Ar]=21/79$, температура 27°C

Также важно учитывать возможные гетерогенные реакции на поверхности частиц. Авторами [32] были рассчитаны времена горения сферических алюминиевых частиц с учетом гетерогенных реакций. Полученные данные представлены на рисунке 5. Проведенные расчеты времен горения для различных окислительных сред не согласуются с экспериментами, в том числе проведенными в работе [7] (см. рисунки 3 и 4). Различие обусловлено условиями сжигания. Полученные в расчетах времена горения мелких (1-10 мкм) частиц на воздухе (использовался синтетический воздух) несколько отличаются от эксперимента (см. рисунок 5), особенно в области повышенного давления в 10 бар. Однако следует заметить, что отсутствие статистически значимого количества экспериментальных данных для частиц микронного размера не позволяет сделать вывод о применимости данных расчетов на практике. Авторы также провели предиктивное моделирование и получили времена горения для капель различного диаметра в окружении воды (см. рисунок 3). Видно, что учет гетерогенных реакций практически не сказывался на временах горения микронных частиц. Однако такой результат следовало бы подтвердить экспериментально прежде, чем принимать его в расчет.

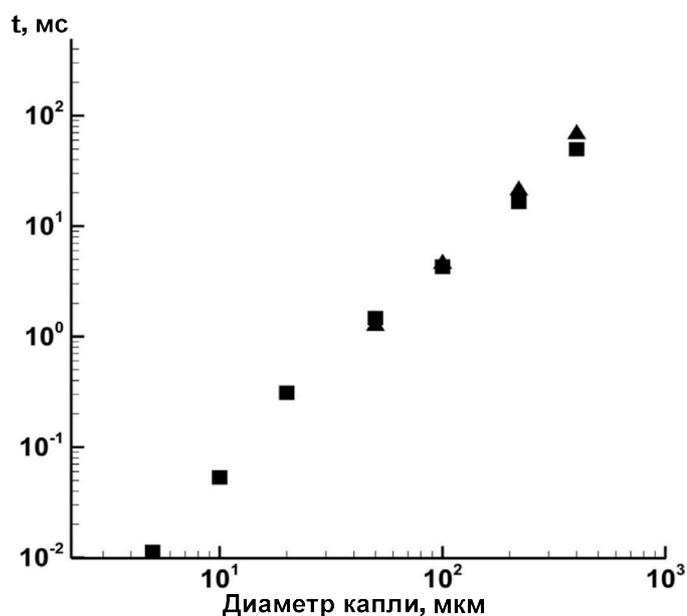
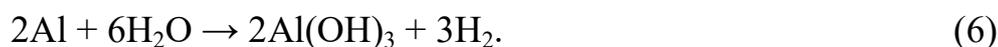


Рисунок 5. Результаты расчета времени горения частиц в водяном паре при давлении 10 бар и температуре 27°C [32]: ■ – с учетом реакций на поверхности, ▲ – без учета реакций на поверхности

Исходя из оценочного размера капель, которые будут образовываться при горении частиц алюминия в исследуемых составах (3-10 мкм), можно предположить, что времена горения будут находиться в диапазоне 100-700 мкс. Конечно, это грубая оценка, в частности, не учитывающая образование окислителя (это также не было учтено в модели [32]).

Немаловажным является вопрос о предельных условиях для существования реакции алюминий + вода (пар) при расширении ПД, содержащих микронные частицы. Например, при метании внешнего слоя не реагирующего при этом состава или при неполной детонации. Так, в [45] реакция частиц порядка 4 мкм (АСД-6) длилась до 33 мс. Следует учитывать, что скорости реакции микронных частиц с жидкой кипящей водой существенно снижаются.

Рассмотрим подробнее горение частиц алюминия в водяном паре. Как было заявлено в [46], точный детальный механизм взаимодействия Al с водой до конца не понятен. В работе [47] обсуждалось окисление Al с водой при температуре до 280°C, в результате которой образуется H₂ и байерит (Al(OH)₃):



Такие же продукты были получены авторами [48], где с помощью вторично-ионной масс-спектрометрии исследовали пассивный оксидный слой частиц алюминия. В работе [49] проводился рентгеноструктурный анализ остаточной конденсированной фазы, образованной при взаимодействии горячих частиц алюминия с водой. Было обнаружено значительное количество бемита Al(OOH) с редкой гексагональной кристаллической решеткой. В исследованиях [50, 51] была предложена модель, описывающая различные стадии окисления алюминия водой, приводящие к конечной одностадийной реакции, представленной в уравнении (6):

1. На поверхности алюминия происходит гидратация оксидного слоя и образование бемита:



2. На границе раздела AlOOH:Al₂O₃:Al алюминий и бемит образуют пузырьки оксида алюминия и водорода:



3. Не прореагировавший ранее бемит реагирует с избытком воды, если она присутствует, с образованием байерита:



Было сделано предположение, что разница давлений между захваченными пузырьками водорода и окружающей средой приводит к разрушению слоя гидратированного оксида, позволяя воде вступить в контакт с алюминиевым ядром и перезапустить процесс реакции. Авторы [52] также предложили аналогичный многостадийный механизм реакции, утверждая, что двумя наиболее доминирующими параметрами, контролирующими выработку водорода, являются уровень pH и концентрация ионов $\text{Al}(\text{OH})_4$ в водном растворе. В результате экспериментов были получены значения энергий активации бемита и байерита при температурах ниже 100°C : 62 кДж/моль и 53 кДж/моль соответственно. Низкотемпературная реакция Al +вода привлекательна в том смысле, что она генерирует водород при невысоких температурах и давлениях. Ожидается, что при более высоких температурах увеличится производство водорода. В работе [47] сообщалось, что энергии активации реакции, определенные в более широком диапазоне температур (до 200°C), составляют 41 ± 5.3 кДж/моль.

Исследование [53], в котором микронные чешуйки алюминия сжигались в смеси с водой в различных соотношениях в диапазоне давлений 1-80 бар показало, что в случае избытка воды (массовое соотношение вода/алюминий, равное 1.5) скорость горения резко снижается с увеличением давления. Также было установлено, что при давлении более 50 атм реакция прекращалась. Снижение скорости горения объяснялось увеличением теплоемкости состава, а значит и теплопотерями. В то же время увеличение массовой доли алюминия в два раза не повлияло на скорость горения.

В работе [54] была проведена оценка эффективности реакции алюминия с водой по результирующей тепловой и механической работе. Исследовались стехиометрические смеси в диапазоне давлений 1-20 атм и температур 326 - 726°C соответственно. Было указано, что время реакции в случае частиц размером 20-50 мкм будет в пределах 2-20 мс. Следует отметить, что обсуждалось только

одностадийное окисление алюминия до оксида алюминия без образования бемита и байерита в несколько стадий. Такое упрощение должно было сказаться на общей энтальпии реакции. Однако учет всех возможных реакций существенно не влияет на общие результаты. Были найдены некоторые зависимости времени реакции от внешних условий. Например, указано, что увеличение давления с 1 атм до 20 атм сокращает время реакции с 10 мс до 5 мс. Также было обнаружено, что изменение температуры оказывает значительное влияние на скорость окисления. Все приведенные выше выводы подтверждаются экспериментом, проведенным авторами [55]. Моделирование показало, что время горения сократилось с 60 мс при начальной температуре 327°С до 5 мс при 727°С. Кроме того, расчеты показали, что в ходе реакции образуется небольшое количество O и O_2 . Такой эффект возможен за счет пиролиза воды.

1.2.3 Алюминий как добавка в ВВ для подводных взрывов

Во многих работах исследовалось влияние различных металлизированных добавок на давление во фронте УВ и энергию взрыва [4, 56-72]. Сравнительные эксперименты показали, что при воздушном взрыве наибольший эффект среди других металлов наблюдается при использовании микрочастиц алюминия за исключением некоторых термитных добавок [66, 71, 73]. В случае же подводного взрыва алюминий также является наиболее распространенным компонентом смеси и используется либо как добавка к бризантному ВВ, либо как часть более сложного состава, например, НВХ-3 или РВХН-111. Взрывы таких смесей производят большое количество прогретого алюминия, способного реагировать с кислородом окружающего воздуха, паром или водой. При таком подводном взрыве, по данным [74], может выделяться большее количество тепловой энергии и водорода. Причем, как отмечали авторы [72], размер частиц по-разному влияет на параметры взрыва. Так, при использовании наночастиц в сравнении с микрочастицами увеличивается энергия УВ, но снижается энергия пульсации. Скорость реакции между порошком алюминия и ПД также увеличивается, однако при этом сокращается время реакции.

Алюминизированные составы характеризуются соотношением Al/O (отношением весовых процентов алюминия и кислорода в составе ВВ), которое редко превышает 1. При взрыве в сплошной воде с увеличением Al/O растет и энергия пульсации за счет поступления в пузырь большего количества газовой фазы из-за увеличения количества водорода. В то же время, как было установлено в [65], для составов с показателем $Al/O > 0.4$ начинает падать энергия УВ, по сравнению с обычными бризантными, не металлизированными составами. Это может быть связано с тем, что весь алюминий, находящийся в составе ВВ, не успевает полностью прореагировать с водой. Тем не менее, авторы [74] показали, что при впрыске струй, состоящих из сильно обогащенных металлом гетерогенных смесей типа «алюминий + твердый окислитель», в воду, алюминий, который остался не прореагировавшим при сгорании заряда, полностью реагирует при смешении струи с водой с образованием бемита и окиси алюминия. Таким образом, для полной реакции избыточного алюминия необходимо хорошее смешение с водой. Неустойчивости Релея-Тейлора, образующейся на границе «вода - продукты взрыва», может быть недостаточно для реакции всего металла в сильнозабалластированных составах. Поэтому целесообразно проводить взрыв в среде, состоящей из участков сильно различающихся по плотности, например, в воде с пузырями воздуха или иного газа.

Еще одной проблемой использования детонирующих составов с высоким показателем Al/O является их детонационная способность. Для того чтобы смесь типа «алюминий + твердый окислитель» детонировала в сравнительно небольших диаметрах, необходима добавка, которая будет «вести» за собой детонационный фронт, способствуя реакции частиц металла и более крупных частиц окислителя. В качестве такой добавки может выступать жидкое моно ВВ, например, нитрометан (НМ) или изопропил нитрат. НМ является более предпочтительным, поскольку обладает более выгодным кислородным балансом. При этом сам НМ, имеющий критический диаметр около 20 мм в каркасе балласта, также необходимо сенсibiliзировать. Известно, что добавки нитроаминов в количестве до 1 вес.% способны существенно снизить критический диаметр НМ, который

становится способным детонировать в капиллярах порядка нескольких десятых долей миллиметра. Однако чувствительность такого сенсibilизированного НМ сравнима с первичными инициирующими ВВ, что существенно повышает опасность взрывчатой смеси. Поэтому предпочтительнее сенсibilизация НМ стеклосферами, а лучше всего, частицами твердого окислителя (так как стеклосферы только добавляют в состав материала, инертного на стадии детонации). Так, например, в работе [75] показано, что добавка частиц порошка ПХА в НМ существенно его сенсibilизируют, что позволяет поддерживать детонационный процесс в чрезвычайно забалластированном инертном составе.

При взрывах этих составов только часть металла реагирует с ПД, содержащими окислительные продукты при расширении. В этом случае непрореагировавший избыточный металл сохраняется готовым (имеет температуру выше температуры самовоспламенения в смеси с водяным паром) для вступления в реакцию с окружающей водой до момента начала интенсивного смешения. В литературе упоминаются составы, в которых соотношение Al/O составляет до 2.36, и которые содержат до 70 вес.% металла [76]. Столь высокая доля избыточного металла при подводном взрыве способна дореагировать с окружающей водой, существенно увеличивая энергию ГУВ как по ударноволновой, так и по пульсационной составляющей. После детонации заряда в начальный момент расширения ПД движутся ламинарно, расширяясь в виде пузыря. Затем, из-за существенной разницы в скоростях ПД и окружающей воды возникает неустойчивость контактной поверхности между ПД и водой. В этом случае имеющийся в составе избыточный металл, будучи прогретым до температур, превышающих температуру самовоспламенения, бурно реагирует с водой. Неустойчивость контактной поверхности значительно увеличивает удельную поверхность контакта металла с водой, что приводит к быстрой реакции в ближней от заряда зоне. Такая реакция не только поддерживает отошедшую ГУВ, но и наполняет образовавшийся пузырь с ПД водородом и перегретым паром, увеличивая его период пульсации.

1.3 Волны сжатия в барботированных средах

Известно, что в некоторых случаях наблюдается усиление ГУВ в воде при столкновении с препятствием. Например, когда ГУВ проходит через пузырьковую завесу при наличии за ней жесткой поверхности. Такое явление было описано в работе [77]. Подобное усиление УВ также отмечено и в [78], в случае, когда УВ взаимодействовала с гетерогенной средой, находящейся вблизи или в непосредственном контакте с защищаемым объектом. Однако в большинстве случаев пузырьковая завеса в воде используется для ослабления интенсивности ГУВ при подводном взрыве. Эксперименты, проведенные в [79], показали, что при прохождении ударной волны через пузырьковый экран, она затухает, причем, коэффициент ослабления ГУВ зависит от объемной концентрации газа и массы заряда. В работах [78, 80, 81] также отмечалось снижение интенсивности УВ при прохождении ГУВ через пузырьковую завесу при критической объемной концентрации воздушных пузырьков свыше 6 об.%. Однако авторами [78] было отмечено, что если между защищаемым объектом и пузырьковой завесой оставался зазор 0.5-1.0 м сплошной воды, то это предотвращало существенные разрушения в случае, когда объемное содержание газа в завесе было меньше критического (6 об.%) из-за сниженного давления волны сжатия и более равномерного распределения давления по поверхности мишени. Таким образом, в случае прохождения ГУВ сквозь гетерогенную сжимаемую среду происходит торможение при одновременном снижении давления на фронте и увеличении длительности положительного импульса сжатия, что приводит к существенному усилению действия на препятствие. Однако в случае, если после слоя гетерогенной среды имеется прослойка сплошной воды, ведущая волна приходит на препятствие со значительно сниженной амплитудой. При этом импульс волны за время ее пробега по участку без пузырьков уменьшается из-за диссипаций в гетерогенном кавитационном слое позади фронта.

В работах [74, 81] наблюдался импульс вторичного давления в случае, когда высокометаллизированные реагирующие смесевые составы типа «порошок алюминия + ПХА + НМ» впрыскивались при высоких давлениях и температуре в

воду с пузырьками. Подобный вторичный импульс давления отсутствовал в аналогичном эксперименте, проведенном в сплошной воде. Вторичный импульс сжатия был обусловлен взаимодействием реагирующей гетерогенной среды с препятствием, во время которого происходит вспышка готового к реакции с водой алюминия при резком повышении температуры при сжатии гетерогенной среды. Эксперименты [74, 76] также показали, что образование реагирующего многофазного облака длится не менее 500 мкс. Однако время реакции в сплошной воде намного больше, чем время разгрузки ГУВ. Это было основной причиной отсутствия вторичного импульса в сплошной воде. В жидкости с пузырьками воздуха резкое уменьшение скорости звука приводит к возрастанию времени разгрузки. Увеличение проницаемости среды для струй ПД при их расширении и рост неустойчивости контактной поверхности ПД – среда за счет разницы в плотностях приводят к росту размеров гетерогенного облака и более интенсивному смешению. Начальное расширение продуктов взрыва и их смешение с окружающей окислительной средой, будет контролироваться не только образованием неустойчивости на контактной поверхности и молекулярной диффузией, но в большей степени турбулентностью. Поэтому очевидно, что взрыв заряда, содержащего избыточный алюминий или другой гидрореагирующий металл, в гетерогенной среде будет сопровождаться более интенсивными вторичными реакциями. В случае взрыва в гетерогенной среде, расположенной рядом с препятствием, отраженная волна сжатия, распространяющаяся по гетерогенному реагирующему облаку, увеличит скорость сгорания частиц алюминия в водяном паре (за счет роста температуры при сжатии) и также будет способствовать генерации вторичных импульсов сжатия. Измерения, проведенные в [74, 76], продемонстрировали увеличение длительности импульса ГУВ минимум в 1.5 раза в экспериментах со взрывом заряда в пузырьковой среде по сравнению с аналогичными опытами в сплошной воде [81]. Реакция протекала интенсивно по всему объему пузырьковой жидкости, на что указывало наблюдаемое свечение.

Принимая во внимание все вышеописанные явления, можно сделать вывод, что ПД высокометаллизированного ВВ, взорванного внутри водно-пузырьковой среды, будут не только более эффективно смешиваться с водой, увеличивая объем вовлеченного в реакцию металла, но и создадут при расширении движение достаточно высокоплотной гетерогенной среды с относительно высокими скоростями. В случае же, если гетерогенная среда представляет собой канал из барботированной воды в направлении от заряда к препятствию, расширение и последующее движение сжимаемой гетерогенной среды после разгона и последующего столкновения будет причиной возникновения импульсов сжатия высокой длительности и амплитуды. В остальном объеме сплошной воды параметры ГУВ будут снижены, так как начальная волна будет существенно ослаблена пузырьковой средой. Это означает, что взрыв может быть направленным вдоль пузырькового канала от заряда к препятствию.

1.4 Механизмы взаимодействия металла с водой в пузырьковом канале

Для понимания механизма реакции избыточного алюминия в составе детонирующего заряда с окружающей водой или гетерогенной средой типа вода – пузырьки воздуха целесообразно рассмотреть такую область науки и техники как гидрореактивные движители (ГРД). Действительно, нагретый гидрореагирующий металл поступает в камеру сгорания при повышенном давлении газа – продукта сгорания вспомогательного порохового состава, либо частичной реакции металла с твердым окислителем в составе гидрореагирующего топлива. В области подводных прямоточных гидрореактивных двигателей опубликовано большое количество работ, в которых исследовалось поступление разогретого металла в виде высокоскоростных струй в камеру сгорания [82-94]. Задачу реагирования металла с пузырьковой средой в пузырьковом канале можно свести к рассмотрению прямоточной камеры цилиндрического типа. Необходимо лишь задать соответствующие соотношения: площадей входного и выходного сечений, а также между скоростями частиц металла на входе и выходе. Кроме того, интерес представляет расчет коэффициента тяги, выполненный для подобных

прямоточных камер. Импульс гидрореактивной камеры будет по порядку величины соответствовать импульсу, передаваемому при столкновении гетерогенной среды в пузырьковом канале неподвижному препятствию. В работе [82] такие расчеты сделаны и представлены вместе с экспериментальными данными. Подобные опыты были также проведены авторами [83], которые численно исследовали водно-пузырьковый прямоточный гидрореактивный двигатель, содержащий 3 ступени. Решение проблемы течения в заполненном пузырьковой средой сопле осуществлялось путем задания распределения скорости воды в сопле и расчета геометрии сопла. Анализ поля течения в сопле показал, что число Маха в критическом сечении равно 1.009, а за горловиной формируется сверхзвуковое пузырьковое течение. Этот результат важен для настоящей работы, так как показывает, что изменяя форму пузырькового канала (на данном этапе мы принимаем, что технически можно добиться любого распределения пузырей в канале или формы канала без уточнения технического решения, как это сделать) можно добиться существенного ускорения пузырьковой среды. Остальные рассматриваемые параметры, такие как скорость судна, массовый расход воздуха, площадь входного сечения, соотношения площадей входного/выходного сечений и начального радиуса пузырька также влияют на тягу ГРД. Она заметно увеличивается с ростом массового расхода воздуха, площади водозаборника и соотношения площадей сечений менее 8. Уменьшение начального радиуса пузырька приводит к усилению тяги. Однако эффект изменения начального радиуса пузырька существенен только для начального радиуса менее $2 \cdot 10^{-4}$ м.

Рассуждая о реакции металлических частиц в пузырьковой среде, следует уделить внимание проблеме смешения ПД, содержащих избыток металлического топлива, с водой. При этом необходимо учитывать множество факторов: энергообмен между фазами, турбулентность, неустойчивость Кельвина-Гельмгольца [95], фазовые превращения и т. д. Столь сложная задача до сих пор не имеет комплексного решения. Однако некоторые процессы рассмотрены детально. Например, значительный прогресс наблюдается в проблеме

взаимодействия потока продуктов сгорания (или газа, вытекающего из сопла) с жидкостью. Подобная задача активно исследовалась с точки зрения горения жидких метательных систем в баллистических установках (BLPG). BLPG имеет камеру сгорания, заполненную жидким монотопливом. Процессы в пузырьковом канале в некотором роде аналогичны горению монотоплива в системах BLPG. Разница лишь в том, что горячие продукты впрыскиваются через сопло, а не за счет сгорания монотоплива. В системе BLPG снаряд начинает движение вследствие расширения продуктов сгорания. В пузырьковом канале, окружающем заряд, горячие продукты производят движение перегретого пара и воды. Рассмотрим подробнее процессы в такой камере сгорания. В такой камере, при впрыскивании горячих продуктов, содержащих избыток алюминия, первоначально формируется сферический пузырек [84]. Сгорая по внутренней поверхности контакта воды и разогретого металла, пузырек выделяет газы меньшей плотности (в основном водород), которые ускоряются по направлению к жидкости. В результате образуется расширяющаяся полость горения, известная как полость Тейлора (ПТ), с вогнутой ведущей поверхностью, пронизывающей жидкость. По мере движения жидкости ПТ развивается все быстрее и образует туннельную полость, пересекающую всю длину жидкого метательного заряда, усиливая тем самым смещение. Помимо развития горения вследствие неустойчивости Тейлора, существует еще один механизм горения. Внутри ПТ газы, движущиеся над жидкостью, вызывают турбулентные поверхностные взаимодействия (неустойчивости Гельмгольца), которые отрывают капли от поверхности жидкости. Последние сгорают очень быстро. Области с неустойчивостью Гельмгольца внутри пузырей приводят к неконтролируемому ускорению горения и могут вызвать наблюдаемое в [85] избыточное давление в камере и беспорядочные колебания давления. Эта проблема может усугубляться образованием множественных ПТ. Основываясь на приведенной выше модели, обоснование, используемое для управления горением, состоит в том, чтобы позволить сформировать только одну ПТ и минимизировать неустойчивости Гельмгольца внутри нее путем поддержания ограниченной глубины ПТ во время

цикла горения. Однако в случае подводного взрыва, при проникновении струй металла в пузырьковую среду подобный механизм интенсификации горения весьма полезен для поддержания волны сжатия в пузырьковом канале и должен учитываться в будущих попытках математического моделирования процесса.

Как было замечено выше, примыкающая к заряду область пузырьковой среды является своего рода сопловой частью ГРД. Поэтому ее форма может влиять на действие пузырьковой среды расширяющейся в сторону неподвижного препятствия. Авторами [86] были исследованы характеристики газовой струи, инжектируемой в воду, в зависимости от сечения выходного сопла и импульса струи для системы воздух-вода. Установлено, что уровень звукового давления для эллиптического сопла ниже, чем у круглых, квадратных и треугольных сопел. Газовая струя движется либо в барботажном, либо в струйном режиме в зависимости от критического числа Вебера We_c . В работе [87] применен комбинированный анализ неустойчивостей Кельвина – Гельмгольца и Рэля – Тейлора для получения критической скорости впрыска газа для перехода от барботажа к струйному режиму. Установлено, что критическая скорость зависит от поверхностного натяжения, диаметра отверстия впрыска и соотношения плотностей газа и жидкости. Критическое число Вебера определялось как $We_c = 10.5(q^*)^{-0.5}$, где q^* — отношение плотностей газа и жидкости. В барботажном режиме ($We < We_c$) частота колебаний значительно ниже, чем в струйном режиме ($We > We_c$), но не зависит от геометрии среза сопла. Более высокая ширина выходящей струи обнаружена в случае эллиптического сопла при $We > 3000$. Очевидно, что для получения максимальной трансформации тепловой энергии продуктов реакции металла и воды расширение должно происходить в барботажном режиме, так как в этом случае поверхность контакта между газом и водой максимальна, а значит, кинетическая энергия при расширении пузырьков будет передана большей массе воды.

Интерес представляет также сверхзвуковое газовое сопло, работающее под водой. Такое сверхзвуковое прямоугольное сопло Лавалья экспериментально и численно исследовалось в работе [88]. Авторы сообщают, что сверхзвуковая

газовая струя из прямоугольного сопла имеет более высокую неустойчивость, чем струя, выходящая из осесимметричного сопла, при том же режиме расширения. Этот эффект может быть полезен для улучшения перемешивания в зоне сгорания пузырькового канала вблизи заряда. Например, путем установки на заряд внешних, искажающих цилиндрическую форму пузырькового канала, специальных пластин.

Численное моделирование таких сложных процессов как горение металла в камере сгорания ГРД и последующее истечение продуктов в открытых источниках представлено плохо. Существует всего несколько работ по численному моделированию ГРД на высокометаллизированном горючем топливе. Например, в [89] проведено двумерное моделирование многофазного турбулентного горения в прямоточном ГРД, работающем на топливе, содержащем магний. Процессы, протекающие в двигателе, очень похожи на имитацию горения впрыснутых в пузырьковую среду высокометаллизированных ПД. В качестве гидрореактивного пиротехнического топлива применяется смесь типа Mg-AP-НРТВ с содержанием металла до 50 вес.%. Рассматриваемая конструкция ГРД включает камеру смешения с конфузуром, камеру сгорания и сопло. Общая длина составляет 400 мм без учета заряда пиротехнического состава, что близко к размерам исследованного в настоящей работе пузырькового канала. Предложена модель горения металлокапельного состава, включающая систему уравнений газофазных реакций, горения частиц и турбулентности. Исследовано влияние соотношения воды и топлива R_{wf} и состава топливной смеси на тяговые характеристики камеры. Получены зависимости удельного импульса, теплового коэффициента полезного действия (КПД) и тягового КПД в зависимости от R_{wf} . Например, для смесей с 50 вес.% Mg, полученные зависимости представлены на рисунке 6. Видно что оптимальная передача энергии топлива в кинетическую энергию струи наблюдается при массовом отношении воды и металла R_{wf} равном 4.3.

При этом тепловой КПД ожидаемо снижается. Это соотношение между водой и металлическим горючим несколько выше, чем в экспериментально подобранном

для аналогичного двигателя [90] ($R_{wf} = 3$ для той же топливной смеси). На эти величины следует ориентироваться при разработке наиболее эффективной взрывчатой системы, в которой энергия ПД передается в результате реакции с пузырьковой средой препятствию в конце пузырькового канала. Полученные количественные характеристики могут быть полезны при расчетах оптимального пузырькового канала для взрывчатой системы, рассмотренной в диссертации, если численную модель горения частиц Mg заменить моделью горения частиц алюминия (например, из работы [91]).

Расчеты по сжиганию металлического топлива в камере сгорания ГРД также представлены в [92]. Авторы рассматривают более прогрессивную конструкцию камеры сгорания, в которой для улучшения перемешивания и дробления капель воды организован ее отток навстречу потоку продуктов сгорания топлива.

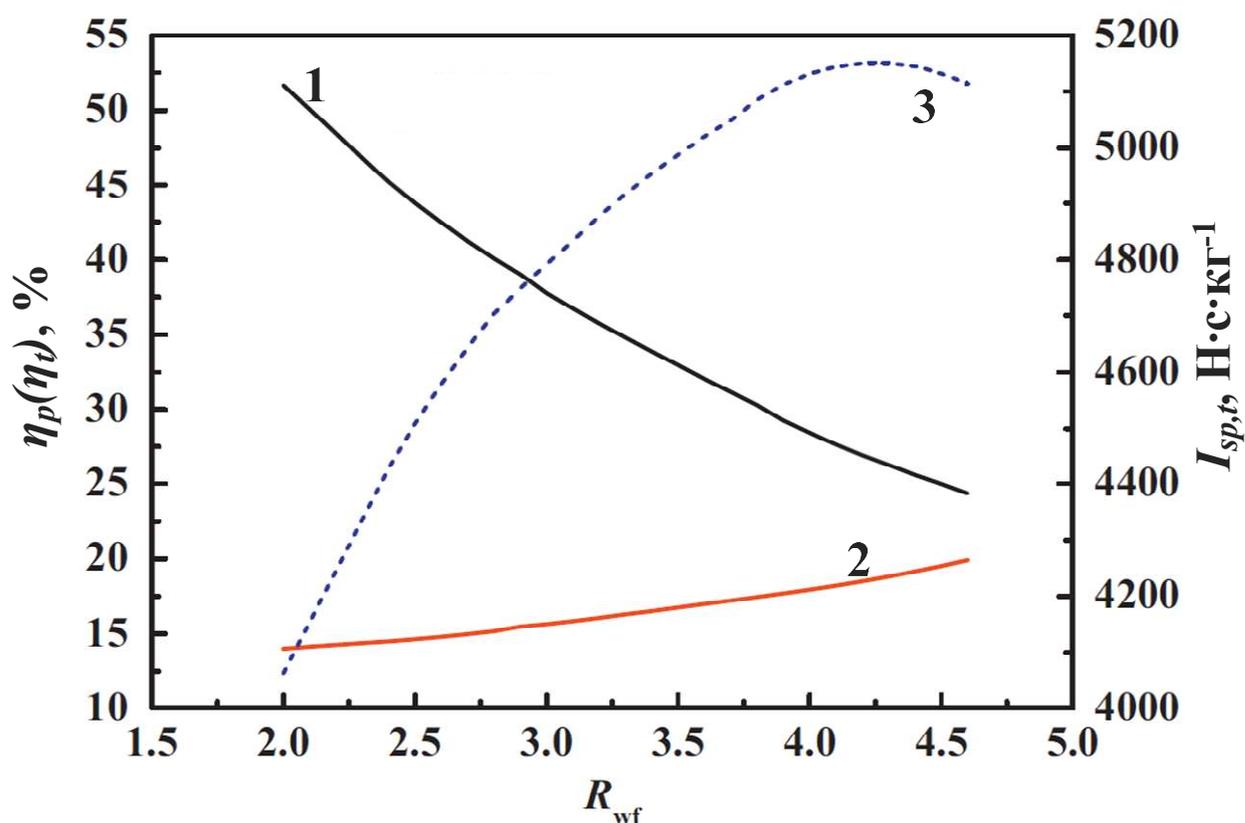


Рисунок 6. Параметры ГРД на металлизированном (50 вес.% Mg) топливе в зависимости от R_{wf} при давлении в камере сгорания 2.5 МПа [89]: 1 – тепловой КПД η_t , 2 – тяговый КПД η_p , 3 – теоретический удельный импульс I_{sp}

Авторы предлагают более сложную модель распределения капель, чем функция распределения Розина-Раммлера (распределения Вейбулла), использованная в [89]. Получены результаты расчетов процессов движения и испарения двух сортов капель: полидисперсной с десятью фракциями и монодисперсной. Сделан вывод, что реальное распределение капель по размерам сильно зависит от рабочего процесса в камере сгорания из-за разного времени и характерного расстояния их испарения. Использованная модель была также проверена экспериментом [93]. Здесь следует отметить, что расчеты наглядно демонстрируют необходимость увеличения интенсивности дробления капель для улучшения перемешивания и скорости реакции при расширении ПД. В качестве решения можно использовать принцип вихревых камер сгорания, рассмотренный в [94]. Для создания вихрей при расширении ПД можно использовать пластины, которые также будут служить до взрыва для измерения формы пузырькового канала вблизи заряда (см. выше).

В целом можно сделать вывод, что отдельные задачи моделирования процессов, протекающих вблизи зоны взаимодействия высокометаллизированных ПД с пузырьковой средой, решены детально и могут быть использованы для построения численной модели формирования направленной волны сжатия в пузырьковом канале.

Таким образом, на основании анализа литературных данных можно сделать вывод, что явления, сопровождающие взрыв в воде с пузырьками, и особенности взаимодействия ГУВ с пузырьковой средой дают возможность организовать направленный подводный взрыв. Если при взрыве высокометаллизированного заряда в насыщенной пузырьками воздуха воде эта среда будет простирается от заряда до препятствия, на которое необходимо воздействовать, то механическое действие энергии взрыва и вторичных реакций металла с водой также будет реализовано в направлении такого гетерогенного канала в сплошной воде.

1.5 Моделирование детонационных процессов в многокомпонентных смесевых металлизированных составах

Для поиска рецептов и последующей оптимизации заданных условий применения и состава смесей необходимо иметь информацию о скоростях экзотермического превращения и взаимодействия компонентов смеси. Общепринятый способ получать необходимые сведения [96-98] основан на математическом моделировании экспериментальных данных по зависимости скорости детонации от диаметра заряда и свойств оболочки с помощью программы [99, 100]. С этой целью проводится серия расчетов, в которых варьируются константы скоростей экзотермического превращения, закладываемые в модель, и выбираются те значения, при которых достигается наилучшее согласие расчетов с экспериментом.

Интерес представляют высокометаллизированные составы, описанные в [81]. В тройных смесях нитрометан + ПХА + алюминий нитрометан используется как сенсibilизатор, ПХА служит окислителем, а алюминий, который берется в большом избытке (массовое отношение $Al / ПХА$ в смесях варьируется от 1:1 до 2:1) предназначен для догорания за фронтом детонации в окружающей окислительной среде (воздух или вода). Естественно предположить, что экзотермическое превращение в этих смесях проходит в несколько стадий, которые включают разложение НМ, разложение ПХА, взаимодействие продуктов разложения НМ и ПХА и горение дисперсного алюминия в среде окисляющих реагентов – продуктов превращения смеси НМ и ПХА.

Предыдущие теоретические исследования неидеальной детонации и скоростей превращения компонентов тройных смесей НМ/ПХА/Al (от 20% до 97% металла в составе) приведены в [101]. В качестве экспериментальной базы использованы литературные данные по детонации смесей НМ с ПХА в тонкостенных стальных оболочках и чистого ПХА и ПХА в смесях с порошками алюминия в целлофановых оболочках [102, 103]. Эксперименты на смесях НМ с ПХА проводились в стальных оболочках на зарядах диаметром от 5 мм до 40 мм с варьированием соотношения компонентов и размера частиц ПХА. Скорость

детонации изменялась на 500–700 м/с в зависимости от диаметра заряда и до 1200 м/с при варьировании размера частиц ПХА. В ряде опытов скорость детонации оказывалась ниже скорости УВ в оболочке. Для численных расчетов использовалась модель стационарной неидеальной детонации со слабо-дивергентным (со слабо отклоняемыми линиями тока) течением в зоне реакции [98, 104, 105].

В работе [101] было получено хорошее согласие расчетов с экспериментом по зависимости скорости детонации от диаметра заряда, что дало возможность определить константы скоростей экзотермического превращения НМ и ПХА для отдельных фракций размеров частиц ПХА. Однако каждый раз при изменении соотношения компонентов или размера частиц ПХА приходилось изменять константы скоростей, чтобы получить согласие расчетов с экспериментом. Общих закономерностей обнаружить не удалось.

Что касается тройных смесей НМ/ПХА/Al, то для них в работе [101] сформулирована теоретическая модель, расчеты по которой не проводились, но приведено сопоставление экспериментальных скоростей детонации с термодинамическими оценками, которое показало, что согласие может быть получено в предположении, что значительная часть ПХА и алюминия не участвуют в экзотермическом превращении.

В последующих исследованиях [106, 107] были получены новые данные по экспериментальной зависимости скорости детонации смесей НМ+ПХА+Al от относительной плотности, изменяющейся за счет содержания нитрометана в стальных трубах. Кроме того, в работе [108] было показано, что зависимость скорости детонации от диаметра заряда может существенно изменяться по мере увеличения отношения между скоростями быстрой и медленной стадий экзотермического превращения вплоть до появления участка, на котором скорость детонации почти не зависит от диаметра заряда (эффект так называемой псевдоидеальной детонации).

ГЛАВА 2. ДЕТОНАЦИОННЫЕ ВЫСОКОМЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ СОСТАВОВ

ХАРАКТЕРИСТИКИ

Характеристики использованных в работе веществ и смесей представлены в таблице 2.

В качестве основного идеального ВВ, с которым проводились сравнения параметров подводного взрыва, был выбран аммонит марки 6ЖВ. Этот выбор был обусловлен плотностью насыпного аммонита, близкой к плотности исследованных неидеальных смесей. Это необходимо для сохранения геометрических размеров зарядов, что обеспечит одинаковые условия проведения экспериментов.

Таблица 2. Характеристики используемых смесей [109]

Название	Вещество	Состав	Масса компонент, г	ρ , г/см ³	Масса бустера, г	Al/O
1:1	Al+ПХА+нитрометан	Al (ПАП-2)	10.79	1.27	4	1.31
		ПХА(40 мкм)	10.79			
		нитрометан	4.42			
1.5:1	Al+ПХА+нитрометан	Al (ПАП-2)	12.95	1.22	4	1.85
		ПХА(40 мкм)	8.63			
		нитрометан	4.42			
2:1	Al+ПХА+нитрометан	Al (ПАП-2)	14.39	1.18	4	2.26
		ПХА(40 мкм)	7.19			
		нитрометан	4.42			
Трионал	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			
RS	RS [56]	Динитроанизол, AP, гексоген и частицы Al	-	-	-	0.373
PBXN-111	PBXN-111[56]	20 вес.% гексоген, 43 вес.% ПХА, 25 вес.% Al и НТРВ	-	-	-	0.459
H-6	H-6 [110]	45 вес.% гексоген, 40 вес.% ТНТ, 20 вес.% Al, 5 вес.% парафин	-	-	-	0.369
HВХ-3	HВХ-3 [110]	31 вес.% гексоген, 29 вес.% ТНТ, 25 вес.% Al, 5 вес.% парафин	-	-	-	0.808

По теплоте взрыва выбранный аммонит аналогичен тротилу. По данным контрольного измерения, проведенного по методу Дотриша (относительно известной скорости детонации реперного детонационного шнура), при использованной насыпной плотности 1.12 г/см^3 скорость детонации составила 4500 м/с . Во всех опытах, кроме опыта по калибровке емкости, масса заряда составляла 30 г . Для сравнения были также использованы тритонал и гексоген. Тритонал – известный смесевой состав для подводного применения, состоящий из тротила с 30% добавкой частиц алюминия [1]. В качестве образца мощного бризантного идеального ВВ был использован флегматизированный гексоген.

Неидеальные составы были выбраны на основе смесей, предложенных в работе [81]. Как видно из сравнения по параметру Al/O в таблице 2, использованные для исследований заряды имеют гораздо большую долю алюминия, чем другие современные ВВ для подводного применения. В использованных ВВ с различным избытком металлического горючего массовое содержание нитрометана оставалось постоянным ($17 \text{ вес.}\%$). Варьировалось только массовое соотношение между алюминием и ПХА от $1:1$ до $2:1$. Использовались алюминиевая пудра марки ПАП-2 и порошок ПХА фракции 40 мкм . Полученная смесь имеет вид гранул со средним размером в диапазоне $0.5\text{--}1.0 \text{ мм}$.

Подготовленные составы засыпались в пластиковые оболочки, изготовленные из полиэтиленовой трубы с внутренним диаметром 20 мм и толщиной стенки 4 мм (см. рисунок 7). Смеси помещались порционно, с промежуточной подпрессовкой каждой порции и контролем плотности заряжания. Таким образом, средняя плотность была постоянной вдоль заряда. Использованные неидеальные смеси не детонируют напрямую от капсуля-детонатора. Поэтому поверх смеси засыпался четырехграммовый бустер из аммонита 6ЖВ. Ввиду того, что в экспериментах использовались сравнительно короткие заряды (до четырех калибров) в малопрочных оболочках из полипропилена (ПП) или полиэтилена низкого давления марки ПЭ100 (ПНД), вопрос о наличии полноценной детонации в зарядах оставался актуальным.

Предварительные опыты и параметрическое моделирование детонации тройных составов типа алюминий + ПХА + нитрометан [81] показали, что низкоскоростной детонационный процесс способен контролироваться не только прочностью оболочки, но и инерциальным подпором прилегающей к заряду воды.

Для проверки наличия в исследованных зарядах детонационного процесса были проведены эксперименты по измерению скорости детонации в удлиненных зарядах в условиях, идентичных опытам по измерению параметров взрывной волны в гетерогенном канале. Для этого составы загружались в полипропиленовые или полиэтиленовые трубы, близкого диаметра, длиной до 500 мм, и погружались в воду на глубину, равную глубине размещения заряда в цилиндрической емкости, и инициировались различными источниками: навеской аммонита 6ЖВ, навеской тетранитропентаэритрита (ТЭН), путем перехода горения в детонацию (ПГД) стехиометрического состава алюминий (ПАП-2) + ПХА (частицы со средним размером в 40 мкм) в стальной оболочке диаметром 10 мм и длиной 150 мм. Последний способ инициирования был выбран для получения параметров инициирующей волны, близких к ожидаемым в основном заряде. Результаты сравнивались со скоростями, полученными на длинных зарядах близкого калибра, но в стальных оболочках (стенка толщиной 4 мм), полученных ранее в [81], и с результатами экспериментов, проведенных без инерциального подпора водой, при взрыве зарядов на воздухе. Скорость распространения детонации контролировалась на 4–7 базах электроконтактными или оптоволоконными датчиками.

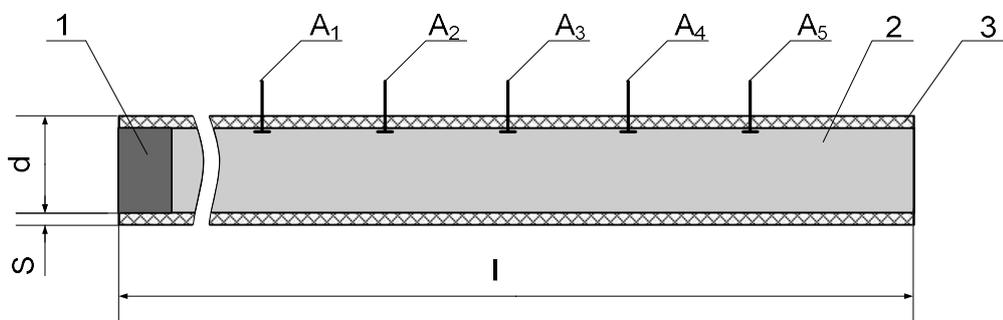


Рисунок 7. Заряд в оболочке с контактными датчиками для измерения скорости ударной волны: 1 – инициатор; 2 – оболочка; 3 – смесь Al/ПХА; A1 - A5 – контактные датчики

Результаты и условия измерений скоростей детонации представлены в таблице 3 и на рисунке 8. Опыты показали снижение скорости детонации в зарядах с составом 1:1 с инерциальным подпором оболочки водой с 3.2 до 3.0 км/с в сравнении с зарядами в стальной оболочке. Взрыв же заряда с составом 1:1 в пластиковой оболочке на воздухе происходит при существенно более низкой скорости детонации 2.33–2.47 км/с.

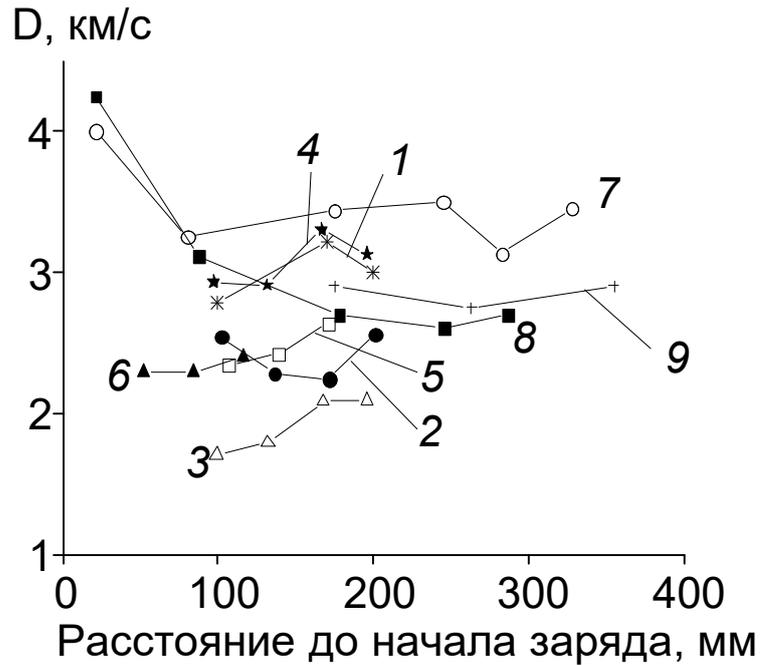


Рисунок 8. Измеренные зависимости скорости детонации D от расстояния до начала заряда [109]

Таблица 3. Условия и результаты проведенных измерений установившейся скорости детонации в высокометаллизированных зарядах [109]

№	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

Различные источники инициирования дали близкие скорости детонации в зарядах с инерциальным подпором водой. Инициирование ПГД в заряде с инерциальным подпором оболочки водой дает близкую скорость (2.9 ± 0.1 км/с). В более богатых алюминием зарядах (2:1) сохраняется тенденция снижения скорости при переходе к зарядам с инерциальным подпором водой. При этом заряды с составами 1.5:1 и 2:1 на 10 калибрах не демонстрируют существенного снижения скорости детонации, как и заряды со смесью типа 1:1, что позволяет сделать вывод о наличии полноценного детонационного процесса в зарядах, использованных в основной серии экспериментов.

2.1 Математическое моделирование и расчет скоростей детонации

Описанные выше новые результаты о скоростях детонации, полученные экспериментально, позволяют сделать вывод, что при анализе смесей НМ/ПХА диапазон скоростей экзотермического превращения ПХА, выбранный в работе [101] на основе данных по детонации ПХА и его смесей с алюминием [102, 103], был существенно завышен. Можно ожидать, что действие ударного сжатия на агломераты частиц ПХА, покрытых нитрометаном, создает гораздо меньшее количество горячих точек по сравнению с частицами ПХА без НМ, которые находятся в прямом контакте с воздухом, заполняющим поры (в силу отсутствия газокомпрессионного эффекта). В результате скорость превращения ПХА в смеси с НМ должна быть существенно ниже, чем в смесях ПХА с алюминием.

Таким образом, стало очевидно, что необходимо провести новые расчеты для смесей НМ с ПХА, используя существенно более низкие значения скоростей экзотермического превращения ПХА и увеличив показатель степени по давлению. Именно эти данные можно будет затем использовать при моделировании детонации тройных смесей с большим избытком алюминия.

2.1.1 Информация о математической модели и входных константах, которые применялись в расчетах

Чтобы получить оценку скоростей экзотермического превращения для двух-трехкомпонентных композиций, необходимо выполнить большой объем

вычислений с варьированием входных параметров задачи. Расчеты проводились с помощью компьютерной программы, созданной на основе квазиодномерной математической модели стационарной неидеальной детонации двух-трехкомпонентных смесей. Модель была разработана для односкоростной двухфазной реагирующей среды и подробно представлена в [98, 101, 104, 105, 108].

Имеется две версии модели в зависимости от свойств оболочки. Если скорость детонации превышает скорость ударной волны, которая распространяется по оболочке, либо оболочка отсутствует или ее влиянием на скорость детонации можно пренебречь, то используется версия модели, учитывающая кривизну ударного фронта детонационной волны.

Однако часто скорость неидеальной детонации оказывается ниже, чем скорость УВ в оболочке. Потери количества движения, уносимого УВ по оболочке в исходное вещество, не дают возможности построить стационарную модель детонации. Тем не менее, путем многочисленных экспериментов (см., например, [111]) было показано, что неидеальные детонационные волны устойчиво распространяются в подобных условиях, и, следовательно, вкладом УВ, бегущих по оболочке впереди фронта детонации, можно пренебречь. Также было показано, что оболочка оказывает значительную поддержку детонационной волне. Основными параметрами оболочки являются ее прочность и инерционность. Для этих условий использовалась вторая версия стационарной квазиодномерной модели неидеальной детонации. Принято, что из-за более высокой скорости УВ по оболочке фронт детонационной волны становится плоским, а течение в зоне реакции дивергентно (линии тока расходятся) благодаря боковому расширению оболочки, которое осуществляется в инерционном режиме. Расчеты, проведенные по обеим версиям модели для условий, когда скорости детонации оказались близки скорости ударной волны по оболочке [101], показали, что при одинаковых значениях входных параметров моделей рассчитанные значения скорости детонации и зависимости скорости детонации от диаметра заряда оказались достаточно близкими. В данной работе

для анализа двойных и тройных смесей НМ+ПХА и НМ+ПХА+АI преимущественно использовалась вторая версия модели. Именно эта версия модели применительно к тройным смесям и входные параметры модели кратко представлены ниже.

Рассмотрим волну неидеальной детонации, которая распространяется с постоянной скоростью D по заряду взрывчатого материала цилиндрической формы, заключенному в массивную оболочку. Волна состоит из ударного фронта, примыкающей к нему зоны реакции и звуковой поверхности (поверхности Чепмена-Жуге), отрезающей зону реакции от тыльных волн разрежения.

Реагирующая среда в зоне реакции представляет смесь исходных компонентов и продуктов их химического превращения. Химическое превращение для трехкомпонентных смесей типа НМ+ПХА+АI 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. Окончательно в реагирующую среду входят 6 компонентов: НМ (индекс $i = 1$), продукты его разложения ($i = 2$), ПХА ($i = 3$) и продукты его взаимодействия с продуктами разложения НМ ($i = 4$), алюминий ($i = 5$) и продукты его горения в среде, получаемой после взаимодействия НМ с ПХА ($i = 6$).

Компоненты находятся в локальном механическом равновесии, то есть у них одинаковы давление P и массовая скорость U , тогда как их температура T , внутренняя энергия e и плотность ρ различаются. Исключение составляет температура продуктов реакции (компоненты 2, 4 и 6), которая принята одинаковой для этих компонентов. Химическое превращение (горение) инициируется в процессе вязко-пластического схлопывания пор в пределах фронта волны. Предполагается, что задержкой инициирования можно пренебречь в масштабе времени химического превращения.

Запишем уравнения течения реагирующей среды в системе координат, движущейся с фронтом волны, при $x \geq 0$. Уравнения неразрывности и сохранения количества движения и энергии смеси:

$$\frac{d}{dx}(\rho U) = -\rho U \frac{d}{dx}(\ln S), \quad (10)$$

$$\rho U \frac{dU}{dx} + \frac{dP}{dx} = 0, \quad (11)$$

$$\frac{de}{dx} - \frac{P}{\rho^2} \frac{d\rho}{dx} = 0. \quad (12)$$

Здесь S – площадь поперечного сечения заряда, которая увеличивается по мере расширения канала оболочки. Уравнения состояния компонентов среды представлены в форме Ми-Грюнайзена [112]:

$$P = \Gamma_i \rho_i (e_i - e_{0i}) + B_i \rho_i^m \left(1 - \frac{\Gamma_i}{m-1}\right), \quad i = 2, 4, 6; \quad (13)$$

$$P = \Gamma_i \rho_i (e_i - e_{0i}) + B_i \left[\left(\frac{\rho_i}{\rho_{0i}}\right)^l \left(1 - \frac{\Gamma_i}{l-1}\right) - \Gamma_i - 1 + \frac{\rho_i}{\rho_{0i}} \frac{\Gamma_i l}{l-1}\right], \quad i = 1, 3, 5. \quad (14)$$

Здесь Γ – коэффициент Грюнайзена, индекс «0» отвечает начальному состоянию, e_0 – химическая энергия, B_i – давление. В формуле (13) для продуктов «холодное» давление записано в виде степенной функции от плотности с показателем степени m , а в формуле (14) для исходных компонентов – от отношения плотности к начальной плотности компонента в степени l . Константы, входящие в уравнения состояния для исходных компонентов, взяты из литературных данных по ударным адиабатам [113]. Для продуктов константы уравнения состояния определялись путем сравнения с термодинамическими расчетами детонационных характеристик, выполненными с помощью компьютерной программы [114] с варьированием начальной плотности. Значения констант, использованные в данной работе, приведены в таблицах 4 и 5.

Уравнения баланса массы представлены для 5 компонентов (учитывается уравнение неразрывности для смеси), а баланса энергии – для трех исходных компонентов:

$$\rho U \frac{d\eta_i}{dx} = -M_i, \quad i = \overline{1,5}; \quad (15)$$

$$\frac{de_i}{dx} - \frac{P}{\rho_i^2} \frac{d\rho_i}{dx} = 0, \quad i = \overline{1,3}. \quad (16)$$

Здесь η – массовая доля, M_i – скорость расхода i -ого компонента смеси в единице объема. Вместо двух недостающих уравнений баланса энергии служат два уравнения, определяющие равенство температуры для компонентов – продуктов реакции:

$$\frac{P - B_2 \rho_2^m}{\Gamma_2 c_{v2}} = \frac{P - B_4 \rho_4^m}{\Gamma_4 c_{v4}}, \quad (17)$$

$$\frac{P - B_4 \rho_4^m}{\Gamma_4 c_{v4}} = \frac{P - B_6 \rho_6^m}{\Gamma_6 c_{v6}}. \quad (18)$$

Здесь c_v – теплоемкость при постоянном объеме. Температура определяется как разность между полной и «холодной» компонентой внутренней энергии, деленная на теплоемкость.

Уравнения для скоростей химического превращения НМ и ПХА выбраны в следующей форме:

$$M_j = \rho_{0j} (\eta_j / \eta_{0j})^k G_j (P / P_r)^n. \quad (19)$$

Здесь ρ_{0j} – теоретическая максимальная плотность исходного компонента, η_{0j} – его массовая доля. Уравнение (19) включает три произвольные константы: коэффициент скорости горения G , показатель степени по давлению n и показатель дегрессивности горения k . Параметр P_r введен для удобства, чтобы коэффициент

Таблица 4. Коэффициенты уравнения состояния для исходных компонентов [115]

Компонент	ρ_{j0} , кг/м ³	B , ГПа	l	Γ	e_{j0} , МДж/кг
(1) НМ	1127	0.46	5.9	0.68	-1.85
(3) ПХА	1950	2.37	6.4	0.92	-2.52
(5) Алюминий	2700	10.74	6.8	1.70	-0.42

Таблица 5. Параметры уравнения состояния для продуктов экзотермического превращения [115]

Компонент	B , Па/(кг/м ³)·m	m	Γ	e_{j0} , МДж/кг	Диапазон давлений, ГПа
(2) НМ	0.0738	3.476	0.60	-6.45	2–15
(4) 46% НМ + 54% ПХА	0.2325	3.294	0.50	-7.55	3–19
(6) Al/ПХА 1:1 + 23%НМ	0.0010	3.953	0.42	-9.56	5–25

G имел размерность сек^{-1} независимо от величины n , и выбран равным 1 ГПа. Предполагая, что горение частиц идет с уменьшением их поверхности, для ПХА принято, что показатель дегрессивности $k = 2/3$.

В случае НМ, согласно экспериментальным данным по критическому диаметру детонации смесей с дисперсными порошками [116], разложение начинается в горячих точках, созданных кумуляцией УВ на поверхности дисперсных частиц и далее идет без существенного изменения поверхности. В данной работе расчеты проводились при $k = 0.3$. Таким образом, уравнения скорости реакции включают по две неизвестных величины: коэффициент скорости G и показатель степени по давлению n .

Формула для скорости превращения алюминия учитывает диффузионный характер взаимодействия и имеет следующий вид:

$$M_{AlO} = \rho_{AlO} G_{Al} (\eta_{Al} / \eta_{AlO})^{2/3} (P / P_r)^n C_{ox} \left[\frac{\eta_{ox}}{\eta_{ox} + \eta_{pr}} \right]. \quad (20)$$

Здесь коэффициент C_{ox} – мольная доля окислительных реагентов в продуктах, которые получаются в результате разложения окислителя, η_{pr} – массовая доля конечных ПД. Так, если окислитель – ПХА, то его продукты разложения в четырех молях содержат два моля H_2O и моль O_2 . Учитывая, что активность паров воды примерно вдвое ниже активности кислорода, получаем для ПХА $C_{ox} = 0.5$. В формуле (20) C_{ox} умножается на текущую долю продуктов разложения окислителя, отнесенную к полной массе продуктов превращения смеси, которая стоит в квадратных скобках. В это уравнение также входят два неизвестных коэффициента: G и n .

Замыкается система уравнений зоны реакции уравнениями аддитивности для смеси:

$$e = \sum_i \eta_i e_i, \quad (21)$$

$$1 / \rho = \sum_i \eta_i / \rho_i, \quad (22)$$

$$\sum_i \eta_i = 1, \quad (23)$$

и уравнениями, которые определяют эффект дивергенции потока. Для радиального расширения канала оболочки S имеем:

$$\frac{d \ln S}{dx} = \frac{2V_r}{RD}. \quad (24)$$

Здесь R – текущий радиус канала оболочки, V_r – скорость расширения канала, для вычисления которой используется следующее дифференциальное уравнение:

$$\rho_w H_c (R_c + H_c / 2) \frac{d}{dx} (V_r) = \begin{cases} DR(P - P_w), & P > P_w; \\ 0, & P < P_w. \end{cases} \quad (25)$$

Здесь H_c и R_c – толщина стенки и начальный радиус канала оболочки, P_w – прочность оболочки, ρ_w – плотность материала оболочки. Уравнение (25) получено в предположениях, что материал оболочки несжимаем, а деформация оболочки протекает в режиме идеальной пластичности и без учета упрочнения.

Система уравнений (10)–(25) включает 12 обыкновенных дифференциальных и 11 алгебраических уравнений для 23 независимых переменных, в число которых входят массовые доли, плотности и внутренние энергии для 6 компонентов, а также плотность, внутренняя энергия, массовая скорость и давление смеси, а также скорость расширения оболочки. Кроме того, в систему уравнений входит скорость детонации D . Ее величина определяется условием, которое характерно для зоны реакции детонационной волны, что решение, начинающееся на ударном фронте волны, должно пройти через сингулярную точку, которая относится к типу «седло» и известна как точка Чепмена-Жуге [117]. В этой точке должны одновременно выполняться равенство массовой скорости ПД и местной скорости звука, а также равенство тепловыделения от химической реакции потерям энергии из-за бокового расширения. В данной работе, чтобы найти соответствующее решение, используется обычный итерационный метод «пристрелки». На рисунке 9 представлен график в координатах «функции от числа Маха (Ma) – длина вдоль зоны реакции» с набором кривых для разных значений скорости детонации, иллюстрирующий этот метод. Варианты 1 и 2 – пересжатый режим, чтобы поддерживать стационарное течение, нужен поршень; вариант 3 – близок к

точному решению; варианты 4 и 5 – сжатие недостаточно, условие $Ma = 1$ достигается при положительном притоке энергии от горения и возникает бесконечный градиент.

Параметры на ударном фронте при заданной скорости детонации определяются решением системы алгебраических уравнений, которая помимо обычных уравнений сохранения массы, количества движения и энергии смеси на ударном скачке включает уравнения состояния исходных компонентов и аддитивности, приведенные выше, а также уравнения, определяющие распределение прироста энергии в УВ между исходными компонентами смеси. Предполагается, что прирост энергии распределяется обратно пропорционально квадрату акустических импедансов [118]. Кроме того, нужно было сделать определенные предположения о степени химического превращения наиболее активного компонента (в данном случае, НМ) во фронте волны и задать плотность продукта. Было сделано предположение, что при ударном сжатии во фронте волны формируются горячие точки, в которых успевает прореагировать небольшое количество НМ (1-2 вес.%). Для задания плотности продукта

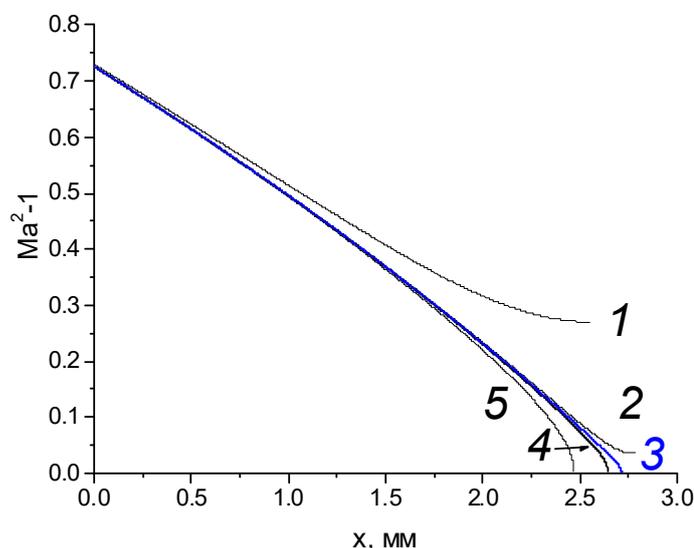


Рисунок 9. Пример решения системы уравнений методом «пристрелки». Смесь 46 вес.% НМ + 54 вес.% ПХА: размер частиц – 200 мкм; диаметр заряда – 21 мм; толщина стенки стальной оболочки – 2 мм, плотность смеси – 1432.7 кг/м³. Скорость детонации: 1 – 5700 м/с; 2 – 5558 м/с; 3 – 5555 м/с; 4 – 5553 м/с; 5 – 5540 м/с

разложения НМ в зависимости от скорости фронта используются результаты термодинамических расчетов, проводимых при подборе коэффициентов уравнения состояния.

В заключение раздела кратко представим версию модели с искривленным фронтом детонационной волны. Искривление фронта отражает отклик зоны реакции детонационной волны на действие боковой волны разрежения. Боковая волна, перенося влияние низкого внешнего давления на зону реакции детонационной волны, вызывает отклонение линий тока, которые в отсутствие боковой волны идут строго параллельно оси заряда. Ударный фронт волны на внешней кромке заряда, реагируя на отклонение линий тока, также располагается под некоторым углом относительно нормали к оси. Так как на оси заряда фронт детонации остается ей перпендикулярен, то стационарная волна под действием боковой волны разрежения приобретает искривленный фронт. Кривизна фронта максимальна на внешней кромке, где действие волны разрежения максимально, и постепенно уменьшается к оси заряда.

Так как скорость фронта вдоль оси заряда одинакова для всех точек по радиусу от оси ($r = 0$) до кромки ($r = R_c$), то скорость волны по нормали к фронту оказывается тем меньше, чем точка ближе к кромке заряда, то есть там, где выше кривизна фронта. Для цилиндрического заряда локальная кривизна фронта K связана с радиусом кривизны R следующей формулой:

$$K = \frac{2}{R}. \quad (26)$$

В данной модели предполагается, что детонационная волна имеет слабо искривленный фронт (то есть радиус кривизны фронта много больше толщины зоны реакции). Для этого случая выполняются условия [119]: скорость волны по нормали к фронту связана единой функциональной зависимостью с локальной кривизной, течение в зоне реакции дивергентно и близко по форме к сферически симметричному, и для эффекта дивергенции выполняется следующее уравнение:

$$\frac{d(\ln S)}{dx} = \frac{K(D/U - 1)}{(1 - Kx/2)}. \quad (27)$$

Это уравнение используется вместо уравнения (24). В версии модели детонации с искривленным фронтом все предыдущие уравнения (10)-(23) и уравнения на ударном фронте волны сохраняются. Система уравнений, описывающих течение в зоне реакции, включает дополнительный параметр – кривизну фронта K . Поэтому решение системы, начинающееся на ударном фронте и проходящее через особую точку Чепмена-Жуге типа седло, дает не скорость детонации, как в предыдущем варианте модели, а кривизну фронта при заданной скорости детонации. Для вычисления диаметра заряда необходима функция $K(D)$, которая определяется в серии решений с варьированием скорости детонации. Расчеты понадобятся в достаточно широком диапазоне изменения скорости детонации от заданного значения скорости детонационного фронта (которое для ясности здесь удобно обозначить D_0) до гораздо более низких значений, реализацию которых можно ожидать по нормали к фронту вблизи кромки заряда.

Процедура определения диаметра заряда при заданной скорости детонационного фронта D_0 состоит в следующем. Форма искривленного фронта детонационной волны в координатах $Y(r)$, $0 \leq r \leq R_c$, находится интегрированием уравнения:

$$Y'' = (1 + Y'^2)[K(1 + Y'^2)^{1/2} - Y'/r], \quad (28)$$

с граничным условием на оси заряда:

$$Y' = Y = 0, \text{ при } r = 0. \quad (29)$$

Здесь аргумент функции $K(D_n)$ связан со скоростью детонации D_0 следующим соотношением:

$$D_n = D_0 / (1 + Y'^2)^{1/2}. \quad (30)$$

Для интегрирования уравнения (28) используется функция $K(D)$, которая определена в серии расчетов уравнений зоны реакции при заданной скорости D_0 . Уравнение интегрируется до кромки заряда $r = R_c$. Величина R_c определяется из условия стыковки на границе раздела ПД с оболочкой, или в случае отсутствия оболочки – с внешней средой (воздух или вода). При наличии толстостенной стальной оболочки используется процедура стыковки с использованием ударных адиабат. Когда заряд заключен в тонкую слабую оболочку, или оболочка

фактически отсутствует (листы целлофана или картона), предполагается, что на кромке заряда точка Чепмена-Жуге совпадает с ударным фронтом волны [120]. Это дает следующее граничное условие на кромке заряда: локальная скорость звука C_c равна массовой скорости U_c по нормали к фронту. Соответствующее уравнение при $r = R_c$ имеет вид:

$$C_c^2 = U_c^2 + D_0^2 / (1 + Y'^{-2}). \quad (31)$$

2.2 Результаты моделирования

2.2.1 Смеси нитрометана с перхлоратом аммония

Экспериментальные данные по скорости детонации смесей НМ с ПХА в широком диапазоне размеров частиц от 9 мкм до 400 мкм и нескольких соотношений компонентов приведены в [107]. Опыты проводились в стальных оболочках диаметром от 3 мм до 40 мм при толщине стенок 2 мм. Скорость детонации измерялась оптоволоконными датчиками, которые вставлялись в тонкие отверстия в оболочках. Погрешность измерения скорости детонации указана в пределах ± 50 м/с. Результаты измерений охватывают диапазон 5300-6800 м/с. Кривые, выражающие общепринятую зависимость скорости детонации от обратного диаметра заряда, имеют слабую выпуклость вниз.

Сопоставляя экспериментальные кривые с результатами численного моделирования, можно определить две неизвестные константы, входящие в уравнения экзотермического превращения анализируемого материала. Так как в случае смесей НМ с ПХА учитываются две реакции: одна – разложение НМ, и вторая – разложение ПХА и последующее взаимодействие продуктов разложения ПХА и НМ, то уравнения экзотермического превращения содержат четыре неизвестные константы (две константы скорости реакции G и два показателя степени по давлению n). Таким образом, для анализа необходимо привлекать дополнительную информацию.

Ранее в [101] при оценке скоростей превращения в смесях НМ с ПХА в качестве дополнительной информации использовались значения скоростей

превращения ПХА, которые были получены при анализе экспериментальных данных по скоростям детонации чистого ПХА и его смесей с алюминием [102, 103]. Однако расчеты для смесей НМ с ПХА дали более сильную зависимость скорости детонации от диаметра заряда по сравнению с той, что наблюдалась в эксперименте. Для согласования был заметно снижен показатель степени по давлению для ПХА. Предполагается, что это решение было неправильным, так как благодаря тому, что в исследуемой смеси частицы ПХА окружены НМ, в ходе ударно-волнового нагружения горячие точки на поверхности частиц ПХА генерируются менее эффективно, чем в ПХА без НМ. Соответственно, скорость превращения ПХА в смеси с НМ должна быть ниже.

Кроме того, в работе [108], посвященной анализу псевдоидеальной детонации, было показано, что зависимость скорости детонации от диаметра заряда может изменяться не только за счет величины показателя степени n , но также за счет отношения коэффициентов скорости реакции G для быстро- и медленно горящих компонентов. Причем, увеличивая это отношение до определенного уровня, можно добиться существенного ослабления зависимости, получив в некотором диапазоне диаметров заряда платообразный участок.

В качестве иллюстрации того влияния, которое оказывает отношение скоростей быстро- и медленно горящих компонентов на зависимость скорости детонации от диаметра заряда, рассмотрим результаты расчетов для смеси 46 % НМ с 54 % ПХА, где размер частиц ПХА составляет 90 мкм. Расчеты проводились по варианту модели с плоским фронтом при значениях показателя n , равных 1, для обеих реакций. Результаты даны в таблице 6. В первой строке таблицы 6 приведены скорости детонации, измеренные в опытах при двух диаметрах заряда: 4 мм и 12 мм. Разница в скорости между ними составляет около 300 м/с. В следующей строке приведены результаты расчетов для базового варианта, которые достаточно близко воспроизводят эксперимент для обоих диаметров заряда. В этом варианте скорость превращения НМ выше скорости превращения ПХА примерно в 13 раз. Затем приведены результаты расчетов, в которых изменялось отношение скоростей превращения компонентов. При этом

коэффициенты G подбирались таким образом, чтобы расчетные скорости детонации в диаметре 4 мм оставались близки экспериментальным.

В строке 3 приведен вариант расчета, названный «плато». В этом варианте отношение скоростей превращения компонентов составило более 130, а разница в скоростях детонации в образцах с диаметром заряда 4 мм и 12 мм снизилась до 60 м/с.

В трех следующих вариантах разница в скоростях детонации растет по мере снижения отношения скоростей превращения компонентов. В варианте 4 при отношении около 1.4 разница скоростей детонации приблизилась к 700 м/с.

Результаты расчетов вместе с экспериментальными данными для композиции 46 вес.% НМ с 54 вес.% ПХА для различных фракций частиц дисперсной фазы приведены на рисунке 10. Значения коэффициентов скорости реакции, которые обеспечили согласие расчетов с экспериментом, приведены в таблице 7. Поскольку расчеты проводились по варианту модели с плоским фронтом, были выполнены только те опыты, в которых скорость детонации не превышала 6100 м/с. В этих опытах УВ по оболочке (для стали скорость звука в зависимости от вида возмущений составляет 5200–5800 м/с) бегут быстрее, чем детонация по заряду смеси. Следует отметить, что для реакции разложения НМ величина коэффициента G в среднем постоянна (0.2 мкс^{-1}) вне зависимости от размера частиц ПХА. В тоже время для реакции разложения ПХА величина коэффициента G монотонно растет по мере уменьшения размера частиц. Влияние размера

Таблица 6. Влияние отношения скоростей превращения компонентов на зависимость скорости детонации от диаметра заряда. Смесь 46 вес.% НМ с 54 вес.% ПХА, размер частиц ПХА – 90 мкм [121]

	Скорость детонации, м/с		Коэффициент G , мкс ⁻¹	
	Диаметр заряда 4 мм	Диаметр заряда 12 мм	ПХА	НМ
Эксперимент	5460	5740		
Базовый вариант	5480	5730	0.0180	0.240
Вариант 1, плато	5440	5500	0.0036	0.480
Вариант 2	5480	5690	0.0160	0.270
Вариант 3	5460	5790	0.0210	0.200
Вариант 4	5470	6150	0.0540	0.075

частиц дисперсных ВВ на скорость их превращения в детонационных волнах отмечалось неоднократно. Для исследуемой смеси 20-кратное увеличение размера частиц привело к примерно 6-кратному уменьшению скорости разложения ПХА.

Оказалось неожиданным приблизительное постоянство скорости разложения НМ при изменении размера частиц дисперсной добавки: исходя из данных [116], можно было предположить, что за счет механизма образования горячих точек при сжатии УВ скорость будет увеличиваться по мере уменьшения размера частиц.

Таблица 7. Значения коэффициентов скорости реакции для смеси 46 вес.% НМ с 54 вес.% ПХА при различном диаметре частиц ПХА [121]

Размер частиц ПХА, мкм	9	35	90	200
Коэффициент G для реакции разложения НМ, мкс^{-1}	0.200	0.220	0.240	0.160
Коэффициент G для реакции разложения ПХА, мкс^{-1}	0.053	0.029	0.018	0.009

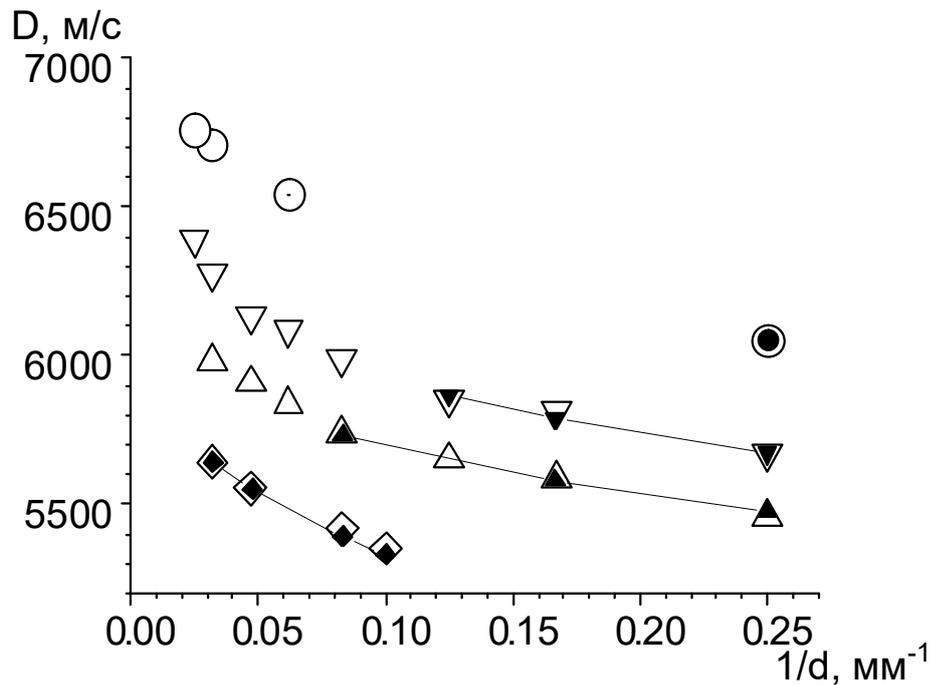


Рисунок 10. Зависимость скорости детонации D от величины, обратной диаметру заряда d , для смеси 46 вес.% НМ с 54 вес.% ПХА с размером частиц: \circ – 9 мкм, ∇ – 35 мкм, \blacktriangle – 90 мкм, \diamond – 200 мкм. Светлые символы – эксперимент [107], темные символы – расчет для варианта с плоским фронтом [121]

Для другой смеси 61 вес.% НМ с 39 вес.% ПХА скорость детонации в зависимости от диаметра заряда была рассчитана с использованием коэффициентов G , которые были определены в расчетах для стехиометрической смеси (46 вес.% НМ с 54 вес.% ПХА) и приведены в таблице 7. Результаты расчетов вместе с экспериментальными данными представлены на рисунке 11. Было получено удовлетворительное согласие расчетов с экспериментом без какой-либо корректировки. В целом расчет слегка завышает наклон зависимостей скорости детонации от обратного диаметра заряда для всех диаметров частиц ПХА.

2.2.2 Трехкомпонентные смеси НМ/ПХА/Al

Опыты по измерению скоростей детонации для смесей НМ+ПХА+Al приведены в [106, 107]. Смеси содержали значительный избыток алюминия (порошок ПАП-2 с частицами чешуевидной формы, пассивированными стеариновой кислотой). ПХА был взят в форме полидисперсного порошка с размером частиц менее 40 мкм.

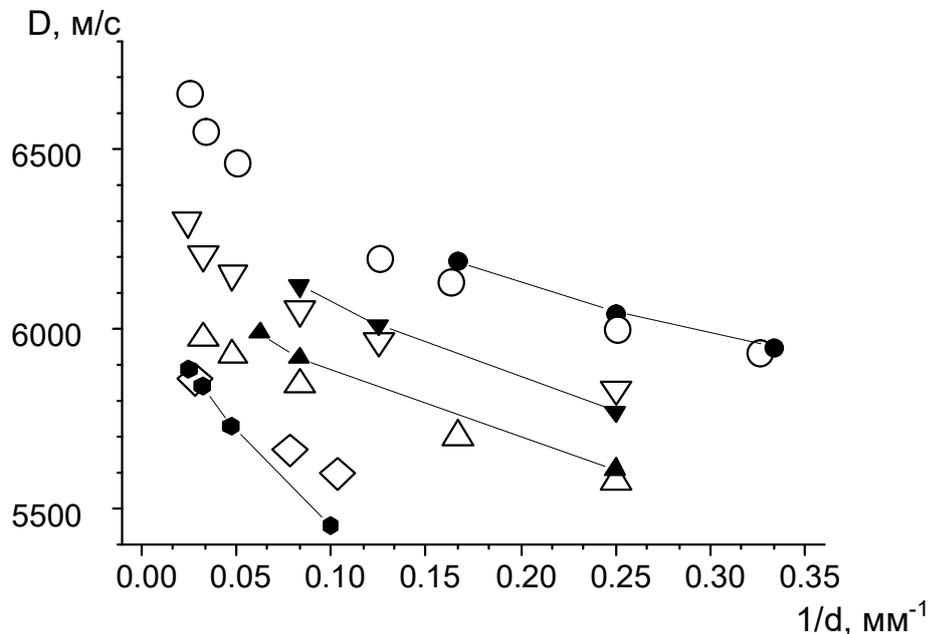


Рисунок 11. Зависимость скорости детонации D от величины, обратной диаметру заряда d , для смеси 61 вес.% НМ с 39 вес.% ПХА с размером частиц: ○ – 9 мкм, ▽ – 35 мкм, ▲ – 90 мкм, ◇ – 200 мкм. Светлые символы – эксперимент [107], темные символы – расчет для варианта с плоским фронтом [121]

Использовались стальные оболочки диаметром 18 мм с толщиной стенок 6 мм. Наиболее подробные данные получены для двух композиций, в которых дисперсные компоненты, алюминий и ПХА использовались в весовом соотношении 1:1 и 2:1.

НМ добавлялся к тщательно перемешанной дисперсной массе в количестве от 10 вес.% до 40 вес.%. Далее исследуемые смеси будут различаться по этой величине. Вместе с содержанием НМ в смеси изменялись также плотность и пористость заряда. Исходные данные опытов представлены в таблице 8.

В расчетах использованы следующие значения коэффициентов скорости разложения компонентов G . Для нитрометана коэффициент G был положен равным 0.2 мкс^{-1} (средняя величина тех значений, которые использовались выше в расчетах для смесей НМ с ПХА). Горение алюминия в окисляющих ПД протекает в диффузионном режиме, и его скорость, очевидно, слабо зависит от давления. В проведенных расчетах показатель степени по давлению был положен равным нулю. Для ПХА взято значение $G = 0.03 \text{ мкс}^{-1}$, которое применялось в тех же расчетах для смесей с частицами ПХА размером 35 мкм. Показатель степени по давлению n для обоих компонентов здесь был выбран равным 1.

Таблица 8. Экспериментальные данные по скорости детонации тройных смесей НМ/ПХА/алюминий в стальных трубах [121]

Добавка НМ к дисперсной массе, вес.%	Массовые доли компонентов НМ/ПХА/Al	Пористость	Плотность, кг/м ³	Скорость детонации, м/с
Алюминий / ПХА = 1:1				
10	0.090 / 0.455 / 0.455	0.40	1230	2700
17	0.146 / 0.427 / 0.427	0.26	1460	3370
23	0.190 / 0.405 / 0.405	0.17	1580	3920
30	0.230 / 0.385 / 0.385	0.09	1700	4540
40	0.290 / 0.355 / 0.355	0.00	1750	5450
Алюминий / ПХА = 2:1				
10	0.090 / 0.303 / 0.607	0.42	1250	1300
17	0.146 / 0.286 / 0.570	0.33	1350	2270
23	0.190 / 0.270 / 0.540	0.18	1540	3400
30	0.230 / 0.256 / 0.514	0.06	1690	3950
40	0.285 / 0.240 / 0.475	0.00	1790	4800

В литературе данные по величине коэффициента G скорости горения алюминия можно найти только для сферического порошка [104, 105] и пиротехнической пудры ПП-2 с частицами чешуйчатой формы [108]. Здесь использовались значения коэффициента G от 0.25 мкс^{-1} до 1.00 мкс^{-1} . Пигментная алюминиевая пудра ПАП-2, которая применялась для приготовления исследуемой тройной смеси, также имеет частицы в форме чешуек. По сравнению с пудрой марки ПП-2, частицы пудры ПАП-2 в среднем имеют несколько большие поперечные размеры и пассивированы заметным дополнительным количеством стеариновой кислоты. Для расчетов были выбраны значение коэффициента G , равное 0.25 мкс^{-1} . Результаты расчетов приведены в таблице 9 и на рисунках 12-14. В таблице 9 помимо рассчитанной скорости детонации приведены также длина зоны реакции, отсчитываемая от фронта волны до точки Чепмена-Жуге, давления на фронте волны и в точке Чепмена-Жуге, а также массовые доли компонентов, успевших сгореть в пределах зоны реакции детонационной волны. Видно, что отношение указанных давлений несколько больше 2. Длина зоны реакции растет по мере уменьшения содержания НМ, изменяясь в диапазоне от 7.4 мм до 14.4 мм.

Таблица 9. Результаты расчетов характеристик детонации тройных смесей НМ+ПХА+Аl [121]

Добавка НМ к дисперсной массе, вес. %	D , м/с	L , мм	P_f/P_{cj} , ГПа	Доли сгоревших компонентов, вес. %		
				НМ	ПХА	Аl
Алюминий / ПХА = 1:1						
17	3520	11.6	7.5 / 3.4	13.5 из 14.5	19.5 из 42.7	2.8
23	4050	10.0	9.8 / 4.7	17.0 из 18.7	17.6 из 40.5	2.5
30	4610	8.9	12.5 / 6.1	21.0 из 23.1	16.5 из 38.5	2.2
40	5220	7.9	15.7 / 7.9	25.6 из 28.6	14.5 из 35.5	1.9
Алюминий / ПХА = 2:1						
10	2460	14.4	3.7 / 1.7	14.0 из 14.5	12.0 из 30.3	2.3
17	2780	12.4	4.6 / 2.2	13.2 из 14.5	12.1 из 28.6	2.0
23	3390	10.2	6.6 / 3.1	16.3 из 18.7	10.0 из 27.0	1.5
30	4170	8.5	9.7 / 4.8	19.6 из 23.1	8.9 из 25.6	1.3
40	4900	7.4	13.4 / 6.6	24.0 из 28.6	8.1 из 24.0	1.2

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.

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 с отношением Al/ПХА 1:1, и чуть больше одной трети в смесях с отношением Al/ПХА 2:1.

Рисунок 12 позволяет сопоставить рассчитанные и измеренные скорости детонации тройных смесей для опытов с двумя указанными соотношениями Al/ПХА. Хорошее согласие опытов и расчетов получено без какой-либо корректировки с использованием коэффициентов скоростей превращения НМ и ПХА, которые ранее были определены в результате анализа детонации двойных смесей этих компонентов.

В качестве примера на рисунке 13 приведены распределения основных характеристик вдоль зоны реакции детонационной волны для расчетного варианта, моделирующего опыт с 23 вес.% НМ при отношении Al/ПХА 1:1, скорость детонации – 4050 м/с. Для этого же расчетного варианта на рисунке 14 представлена диаграмма массовой скорости вдоль зоны реакции в зависимости от времени. Экспериментально эту диаграмму можно проверить с помощью электромагнитной методики [122].

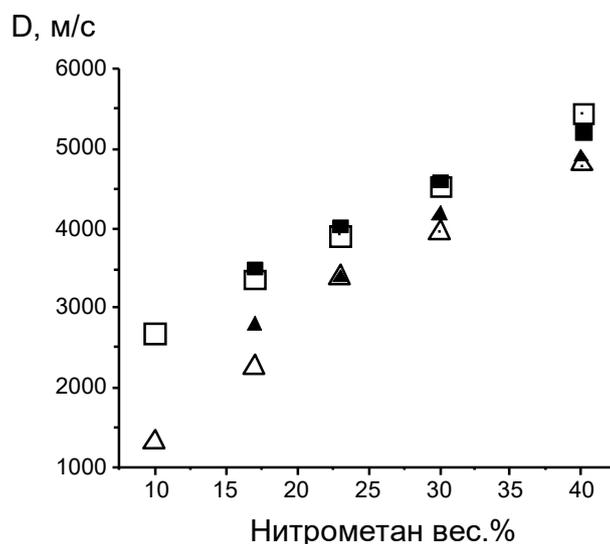


Рисунок 12. Зависимость скорости детонации тройных смесей НМ/ПХА/Al от добавки нитрометана к дисперсной фазе. Светлые символы – эксперимент [107], темные символы – расчет [121]: квадраты – Al/ПХА = 1:1; треугольники – Al/ПХА = 2:1. Оболочка: сталь, диаметр 18 мм, толщина стенок 6 мм

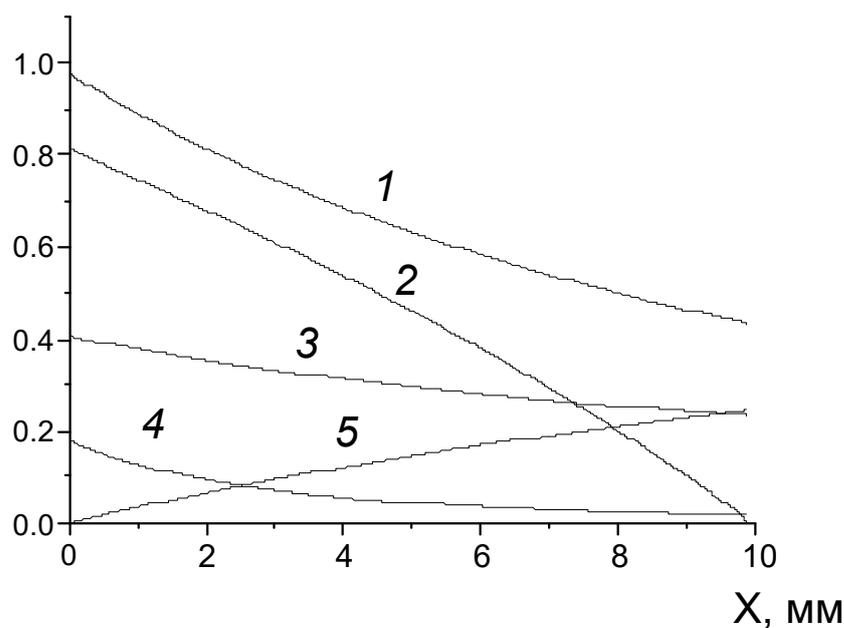


Рисунок 13. Расчетное распределение основных характеристик для тройной смеси с 23 вес.% НМ + 38.5 вес.% А1 + 38.5 вес.% ПХА вдоль зоны реакции детонационной волны [121]: 1 – давление в 10 ГПа; 2 – $1-Ma^2$ (Ма – число Маха); 3 – массовая доля ПХА; 4 – массовая доля НМ; 5 – массовая доля ПД. Скорость детонации 4050 м/с

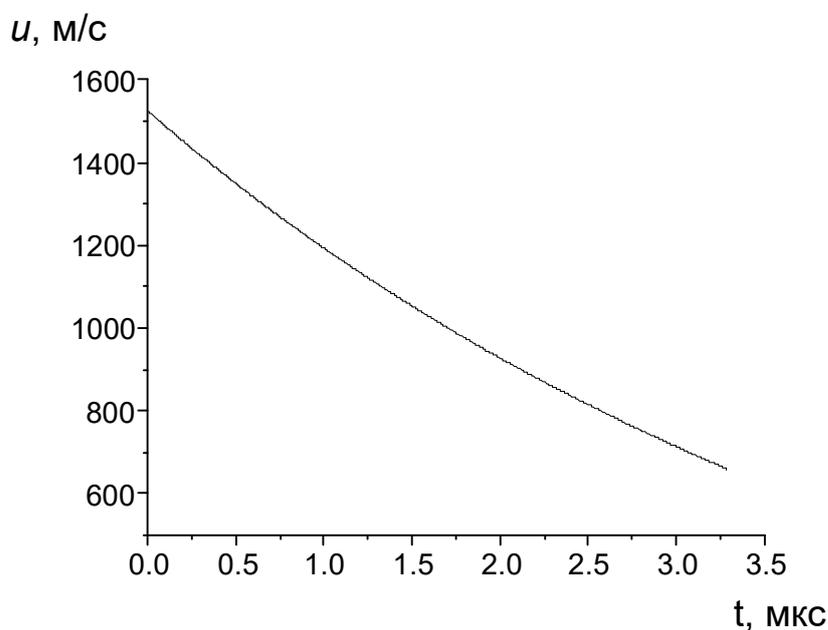


Рисунок 14. Диаграмма массовой скорости вдоль зоны реакции в зависимости от времени [121]. Расчет выполнен для смеси 23 вес.% НМ + 38.5 вес.% А1 + 38.5 вес.% ПХА. Скорость детонации 4050 м/с

Рассмотрим, что могут дать расчеты для детонации тройной смеси с искривленным фронтом. Такой режим реализуется, к примеру, при использовании тонких пластиковых оболочек. На рисунке 15 приведена связь между скоростью детонации и кривизной фронта, рассчитанная для той же тройной смеси 23 вес.% НМ + 38.5 вес.% А1 + 38.5 вес.% ПХА. Пользуясь этим графиком, можно оценить радиус кривизны, который будет иметь фронт детонации на оси заряда для данной смеси. Так, при скорости детонации 3500 м/с расчет дает для радиуса кривизны значение 50 мм, а при скорости 4000 м/с – 80 мм.

Используя в уравнении (5) функцию связи между кривизной фронта и скоростью детонации, как на рисунке 15, и проведя интегрирование, можно получить, что заряд данной смеси диаметром 50 мм, помещенный в тонкую целлофановую оболочку, будет детонировать со скоростью 3500 м/с.

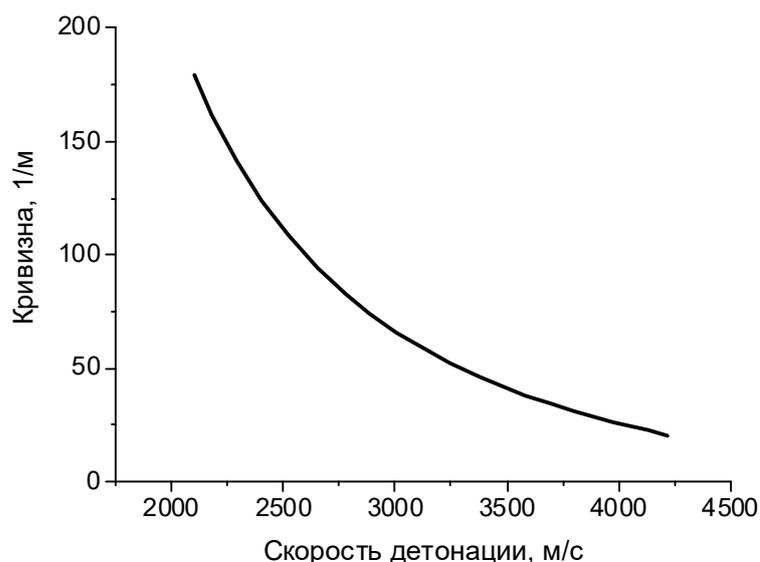
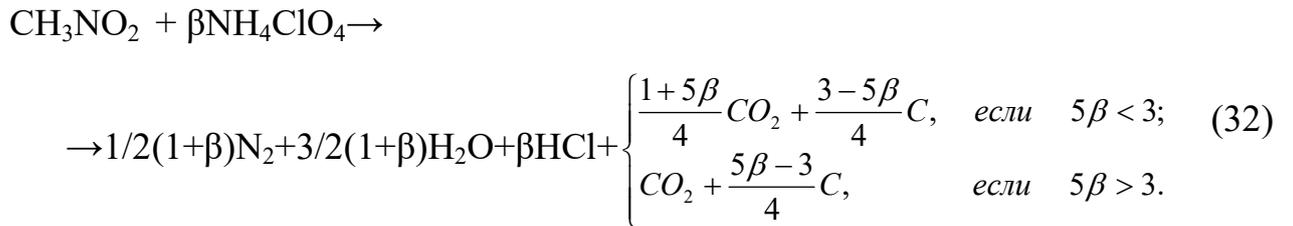


Рисунок 15. Связь между кривизной фронта волны и скоростью детонации [121].
Расчет для смеси 23 вес.% НМ + 38.5 вес.% А1 + 38.5 вес.% ПХА

2.2.3 Расчет теплоты взрыва тройных составов

Для оценки полной теплоты взрыва был проведен термодинамический расчет реальной детонации и дальнейшего дореагирования ПД для тройных смесей НМ+А1+ПХА (см. таблицу 10). Выделение энергии можно разделить на три стадии:

1. Реальная детонация (инертны от 1/2 до 2/3 ПХА и большая часть А1 (>97 вес.%):



В сбалансированном составе отношение ПХА к НМ $\beta=3/5=0.6$ (один моль НМ на 0.6 моль ПХА). Незначительное количество А1 (<3 вес.%) реагирует с водой, образовавшейся при реакции (32):



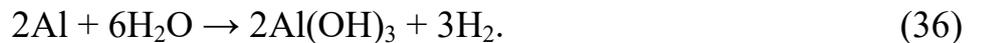
2. Горение А1 с ПХА в волне разрежения:



3. Дореагирование А1 с водой может происходить несколькими способами:



или, как было предложено в работах [50, 51]:



В работе [74] при впрыске смесей А1 с ПХА в воду в продуктах наблюдался как Al_2O_3 , так и $\text{Al}(\text{OH})_3$.

Таблица 10. Рассчитанная теплота взрыва тройных составов

Состав	Стадии, МДж/кг			Полная теплота, МДж/кг
	1 (НМ+А1+ПХА, вес.%)	2 (А1+ПХА, вес.%)	3 (А1+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 А1)	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 А1)	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 А1)	10.20

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ НЕИДЕАЛЬНОГО ПОДВОДНОГО ВЗРЫВА

3.1 Пристрелочные эксперименты

Для оценки стойкости емкости к нагрузкам при неидеальном подводном взрыве были проведены предварительные взрывные эксперименты с зарядами аммонита 6ЖВ и состава 1:1 (см. таблицу 2) массой 50 г в емкости объемом 4.5 м^3 , далее – малой емкости, идентичной по конструкции с основной, но меньшей высоты (1.8 м).

3.1.1 Взрывы идеального и неидеального зарядов в малой емкости

Вначале был проведен опыт с навеской 50 г аммонита 6ЖВ. Заряд размещался по центру емкости на глубине 1 м. Инициирование заряда было от верхнего торца. Емкость была заполнена водой на 1.7 м. Для оценки длительности ожидаемого процесса дореагирования алюминия с водой проводилась скоростная видеосъемка. Подборка кадров видеосъемки показана на рисунке 16. В результате взрыва емкость приподнялась вверх на 15 см. Брызгообразование при этом было незначительным. Предположительно этот эффект связан с тем, что масса воды под зарядом была меньше, чем над ним, и при схлопывании газового пузыря во время первой пульсации большая масса потянула меньшую вверх.



Рисунок 16. Последовательные кадры взрыва аммонита на глубине 1 м: а – 0 мс; б – 8 мс; в – 12 мс; г – 15 мс

При таком движении емкости вверх часть грунта ссыпалась в образовавшуюся полость, что исключило опускание емкости на прежнее место. Для проверки этой гипотезы был проведен опыт, в котором заряд располагался на глубине 50 см от поверхности воды, т.е. масса воды под зарядом была заведомо больше массы воды над ним (см. рисунок 17). Видно, что емкость осталась неподвижной, а брызги образовали вертикальную струю, соответствующую классическому взрыву на мелководье. Затем был проведен тест с алюминизированным ВВ. Заряд состоял из 30 г смеси 1:1. Инициирование заряда проводилось от верхнего торца. Состав ВВ был выбран из ряда рассмотренных ранее смесей (см. главу 2), как обладающий наибольшей скоростью детонации. Он был расположен на глубине 70 см.

Характерные видеокадры процесса показаны на рисунке 18. На кадрах видно, что емкость движется вверх. Перемещение емкости в этом случае оказалось сильнее, чем в случае взрыва аммонита. Длительность процесса также существенно выше. Съемка показала эффект движения стальных стенок емкости внутрь и затем наружу. Такие периодические движения стенок связаны с пульсациями газового пузыря после взрыва и с поступлением в пузырь продуктов дореагирования алюминия с водой (водорода и пара). Кроме того, видна вторичная вспышка (свечение на рисунке 18з), связанная с повторным



Рисунок 17. Последовательные кадры взрыва аммонита на глубине 0.5 м: а – 0 мс; б – 8 мс; в – 12 мс; г – 15 мс

воспламенением не прореагировавшего алюминия с парами воды при сжатии пузыря в ходе первой пульсации.

Были проведены измерения давления при взрывах идеального и алюминизированного зарядов. На глубину 70 см был опущен датчик давления PS02 (пр-во Глобал Тест, г.Саров), установленный внутри защитного армированного резинового шланга таким образом, как это показано на рисунке 19. Датчик располагался в 40 см от стенки емкости.

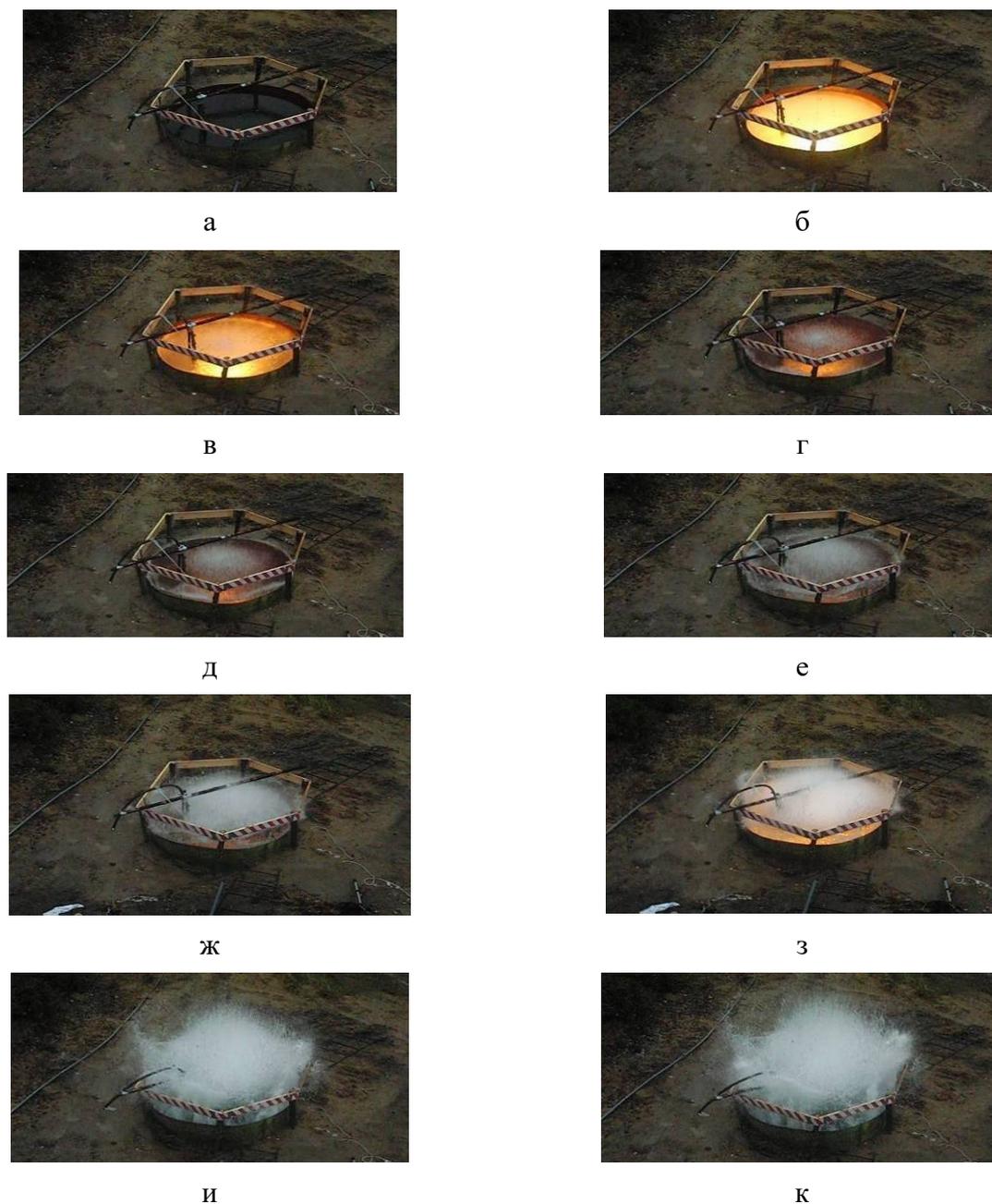


Рисунок 18. Последовательные кадры взрыва состава 1:1 на глубине 70 см: а – 0 мс; б – 3 мс; в – 5 мс; г – 7 мс; д – 8 мс; е – 15 мс; ж – 25 мс; з – 38 мс (повторная вспышка); и – 66 мс; к – 80 мс

Полученные записи давления для взрыва 50 г аммонита и 30 г смеси 1:1 показаны на рисунках 20 и 21 в едином масштабе. Уровни максимального давления составили 80 атм для аммонита и около 160 атм для смеси 1:1, соответственно. В случае алюминизированного состава на 2-ой мс видна волна сжатия, связанная с дореагированием избыточного алюминия с водой. В результате пристрелочных экспериментов были определены уровни давления и длительности процесса для идеального ВВ и неидеальных составов.

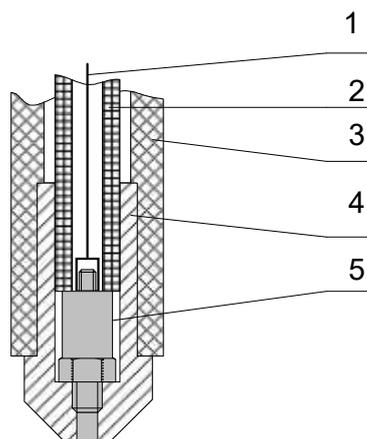


Рисунок 19. Чертеж заделки датчика давления в защитную оболочку: 1 – antivибрационный коаксиальный высокочастотный кабель, 2 – 5 мм слой полиуретановой пены, 3 – 40 мм армированный текстильным кордом резиновый шланг, 4 – латунное гнездо датчика, 5 - пьезодатчик давления PS02

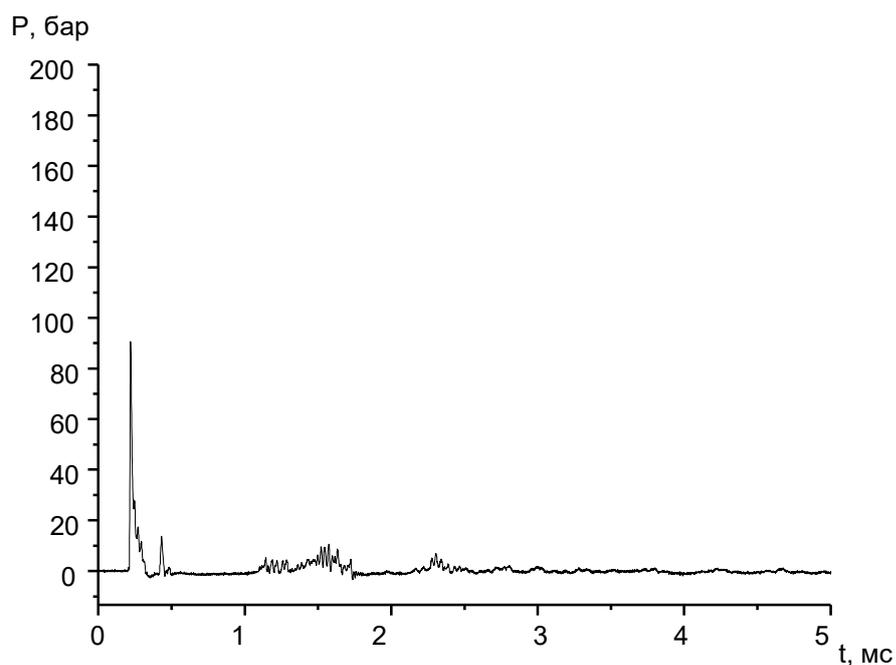


Рисунок 20. Запись давления при взрыве 50 г аммонита 6ЖВ

3.2 Выбор оптимальных значений глубины и массы заряда

Обнаруженный в пристрелочном эксперименте эффект движения емкости вверх показал необходимость провести перегрузочный тест, чтобы определить предельную для емкости массу заряда. Для этого был взорван состав типа 1:1 удвоенной массы (60 г) с инициированием от верхнего торца заряда. После взрыва емкость необратимо выдвинулась из грунта на 0.5 м. Проведенный после эксперимента осмотр выявил образование трещин на стальных стенках емкости, в основном вдоль сварочных швов. Для выяснения причин растрескивания стенок емкости видеозапись была подвергнута компьютерной трассировке в программе Virtual Dub путем применения к видеопотоку фильтра 'emboss'. В качестве референсных объектов при трассировке были выбраны защитное ограждение (неподвижное в ходе опыта) и подвижный край емкости. Характерные кадры и результат трассировки показан на рисунке 22. Видно, что деформация стенок достигает нескольких десятков сантиметров и направлена внутрь. Этот эффект связан с всасыванием оболочки емкости внутрь за счет схлопывания пузыря и движения массы воды в направлении от стенок к центру емкости.

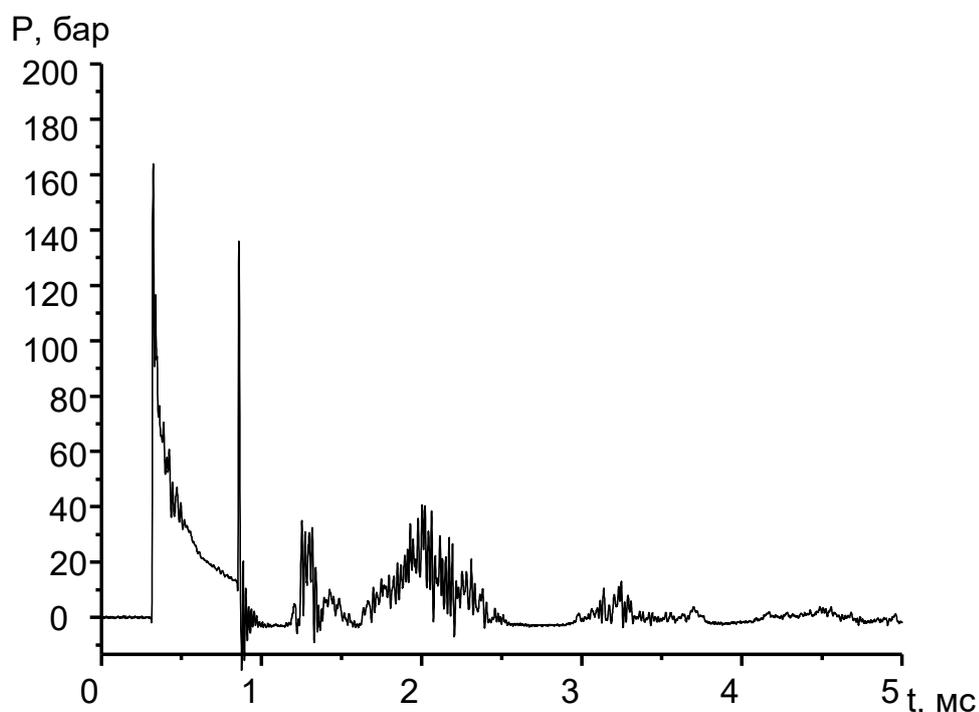


Рисунок 21. Запись давления при взрыве 30 г состава типа 1:1 [76]

Исследование осколков оболочки заряда (см. рисунок 23) показало, что в результате взрыва образовались несколько достаточно крупных струй ПД, повлекших образование гетерогенного пузыря большого объема. Можно сказать, что реагирующая гетерогенная смесь в этом опыте заполняла в какой-то момент большую часть объема бассейна. При последующем охлаждении и конденсации пара произошло схлопывание гетерогенного пузыря, вызвавшее течения направленные внутрь емкости.

Следует пояснить отличие эффекта механического действия неидеального заряда, проявившееся в большем перемещении емкости вверх, чем при взрыве аммонита. Примем во внимание, что заряд был сдетонирован от верхнего торца. Это означает, что векторы скорости разогретых и готовых к реакции с водой частиц при расширении продуктов взрыва были направлены преимущественно вниз. На основе предыдущих работ, например работы [81], было установлено, что

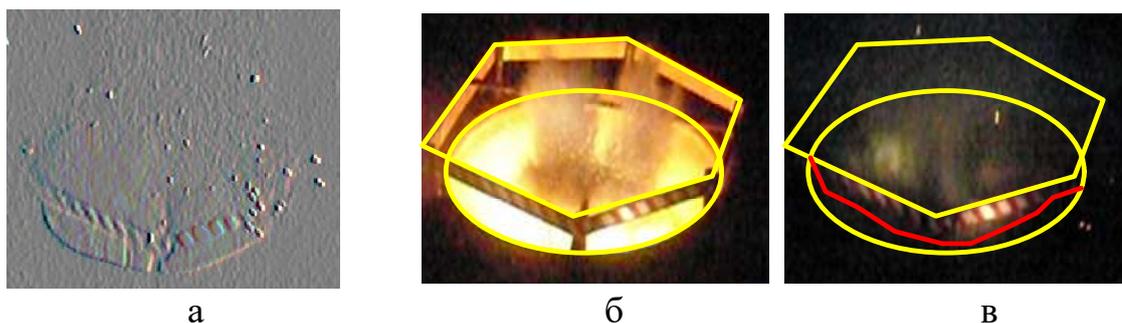


Рисунок 22. Результат компьютерной обработки изображения: а – трассировка; б – до перемещения стенок, желтые линии – референсные линии начального положения края емкости и неподвижного ограждения; в – максимальное перемещение стенок, красная линия ограничивает край емкости в момент максимальной деформации



Рисунок 23. Осколки пластиковой оболочки заряда

струи продуктов могут пронизывать окружающую воду на расстояние до нескольких десятков сантиметров. Хорошим примером такого нисходящего распространения струй являются опыты, проведенные в работе [74]. Заряды, подобные используемым в этой работе, были инициированы сверху в полиэтиленовых емкостях, наполненных водой. Проводилась скоростная съемка взрыва. На рисунке 24 показано, каким образом расширяется облако продуктов взрыва. Видно, что расширение направлено преимущественно вниз и в стороны.

На рисунке 25 показана схема расширения газового пузыря для идеального и

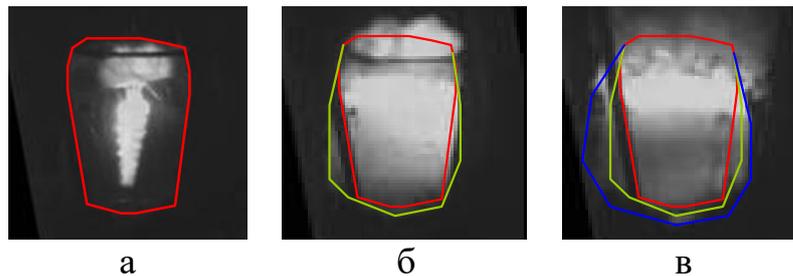


Рисунок 24. Взрыв неидеального заряда 1:1 в пластиковой оболочке диаметром 20 мм, помещенного в полиэтиленовый мешок, наполненный водой. Показаны последовательные кадры скоростной съемки (5000 кад/с) с обведенными контурами расширяющегося вниз и в стороны облака продуктов взрыва: а – красный контур – начальное положение оболочки, 1 мс; б – желтый контур – расширение ПД, 3 мс; в – синий контур – максимальное расширение ПД, 5 мс

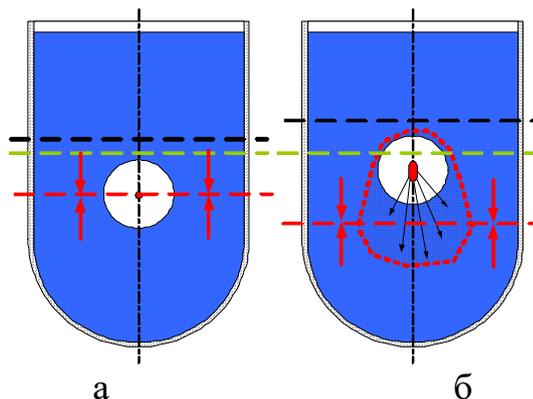


Рисунок 25. Схемы расширения газового пузыря при подводном взрыве: а – идеальное ВВ; б – неидеальное ВВ. Зеленая линия – плоскость, разделяющая равные массы воды «до» взрыва, черный пунктир – граница между равными массами воды «после» взрыва и расширения газового пузыря до его максимального размера, красный пунктир – форма облака продуктов взрыва

неидеального ВВ при инициировании сверху. Отметим, что черный пунктир в случае неидеального взрыва расположен выше. Это связано с бóльшим объемом газовых продуктов, включая пар и водород, образовавшихся из-за реакции избыточного алюминия с водой. Кроме того, из экспериментов стало известно, что при неидеальном взрыве начальное движение емкости в направлении вниз гораздо меньшее, чем при взрыве аммонита. При этом вверх она движется значительно дальше. Причина такого поведения заключается в форме облака продуктов при неидеальном взрыве (см. рисунок 25б). Из-за упомянутого выше заданного начального направления истечения продуктов взрыва объем нижней части облака значительно превышает верхний, так как струи продуктов движутся вниз и реакция избыточного алюминия с водой также происходит преимущественно в нижней части облака. Таким образом, воображаемая плоскость, разделяющая газовый пузырь на равные объемы, будет при неидеальном взрыве располагаться ниже. Эта же плоскость будет разделять слои воды с различным направлением течения (в системе координат связанной с емкостью) в момент начала схлопывания пузыря. В этот момент над красной линией (см. рисунок 25б) оказывается существенно большая масса воды. Вся механическая система подобна растянутой пружине с грузами разной массы на концах и при сжатии большая скорость будет у меньшего груза. То же и в эксперименте при схлопывании пузыря часть воды под красным пунктиром с большей скоростью будет двигаться вверх, чем большая масса над этой линией вниз. Слой воды под линией будет стремиться оторваться от дна. Заметим, что при нормальных условиях разрыв сплошности воды возможен при отрицательном давлении -10 атм, что в пересчете на приложенную ко дну тянущую нагрузку составит 300 тонн. Она на порядок превосходит массу емкости вместе с водой и полученного усилия достаточно как для преодоления сил трения о грунт, так и для поднятия окружающего грунта вместе с емкостью.

Пристрелочные эксперименты показали, что для проведения опытов с неидеальными зарядами необходимо учитывать соотношения между массами воды над и под зарядом во избежание выдвигания цистерны из грунта. Простой

расчет для основной емкости, даже без учета вышеописанного эффекта несимметричности газового пузыря, показывает, что подходящее место для размещения заряда будет находиться на расстоянии 1.9 м от дна. Однако, чтобы учесть эффект действия асимметричного пузыря, заряд необходимо поднимать еще выше. В нескольких предварительных опытах был опробован метод снижения эффекта движения емкости вверх. Метод основан на установке пористого воздушнонаполненного покрытия на дно. При отрицательных нагрузках от присоединенной к стенке дна воды воздух, заключенный в закрытых порах покрытия, расширяется и таким образом предохраняет дно от тянущей нагрузки. Проведенные тесты показали, что емкость действительно остается неподвижной, однако пористое покрытие разрушается после каждого эксперимента. Ввиду трудоемкости его замены, связанной со сливом воды и очисткой дна от остатков старого покрытия, от такой методики решено было отказаться и минимизировать эффект путем выбора глубины размещения заряда. Полностью исключить эффект не удалось, однако он был минимизирован путем засыпки на дно слоя гравия толщиной 20 см. Емкость, используемая для основной серии экспериментов, в итоге выдвинулась из грунта суммарно на 0.7 м (см. рисунок 26).



Рисунок 26. Основная емкость после проведения серии экспериментов выдвинулась из грунта на 0.7 м

3.3 Оборудование и методика для измерений параметров волн сжатия от неидеальных взрывов в воде

Принимая во внимание эффекты, сопровождающие неидеальный взрыв алюминизированного взрывчатого состава, наблюдаемые в ходе пристрелочных опытов, стало очевидно, что измерения только лишь давления в воде и периода пульсаций не обеспечат корректных измерений энергетики взрыва. В силу наблюдаемых существенных колебаний стенок емкости, представляющей собой тонкостенную оболочку, невозможно учесть потери энергии на перемещение масс воды вследствие деформаций. Поэтому на некотором расстоянии над зарядом был размещен тяжелый цилиндр, снабженный акселерометром для измерения интегрального механического действия взрыва на его торец, выраженного в сообщении некоторой кинетической энергии. Такое подвижное препятствие, далее импульсомер, будет подробно рассмотрено ниже. Из экспериментов, проведенных в работе [76], известно, что для корректного проведения измерений параметров подводного взрыва необходимы такие размеры опытного бассейна, при которых время циркуляции волны до стенок и обратно было бы заведомо больше времени ожидаемого процесса. Пристрелочные эксперименты показали, 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 1.05 м. Для измерений импульса при помощи подвижного препятствия необходимо также учитывать время циркуляции волны до разгрузки, которое также составляет 1.0-1.5 мс. Опыты в трубах [49,74], где неидеальные заряды массой 10 г создавали движение гетерогенной среды, действующей на поршень, отстоящий на 0.5 - 0.7 м от заряда, показали, что превышение расстояния в 0.7 м приводит к снижению параметров импульса. Поэтому для опытов с зарядами большей, но сравнимой массы, в условно неограниченном бассейне выбиралась дистанция развития реакции и ускорения гетерогенного столба перед столкновением с подвижным препятствием, сравнимая по порядку величины, то есть 1 м. Однако выбранное

расстояние в 1 м является оценочным, исходя из соображений масштаба эксперимента, и было впоследствии уточнено.

В работе использовались две стальные емкости с толщиной стенки 12 мм и полуэллиптическим днищем, полученные путем разделения на две разные части (1/3 и 2/3 длины) автоцистерны диаметром 2.2 м: малая, объемом 4.5 м³, использовалась для пристрелочных экспериментов, и основная, вместимостью 13.5 м³ и высотой 4.5 м, использовалась для основной серии экспериментов (см. рисунок 27). Обе устанавливались в песок вертикально. Основная емкость была обсыпана на высоту 4 м песком. Ширина вала песка составляла не менее 1 м у вершины. Такая обсыпка песком была необходима для создания инерциального

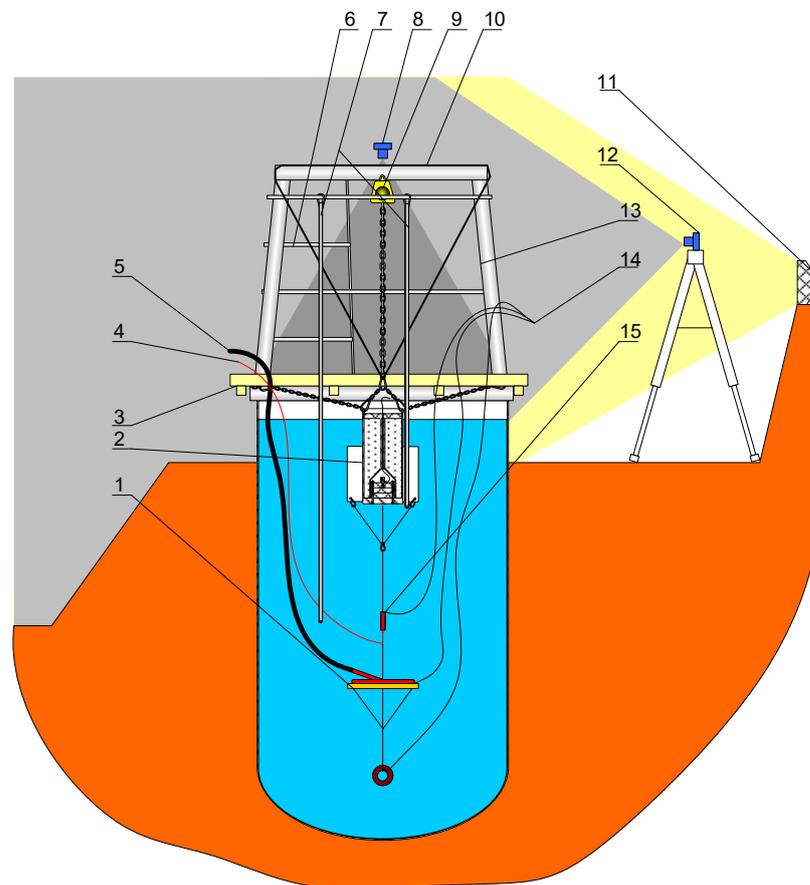


Рисунок 27. Общий чертеж установки с размещением всех элементов: 1 – генератор пузырьковой колонны; 2 – подвижное препятствие; 3 – съемный деревянный помост; 4 – боевая линия капсуля; 5 – шланг подачи воздуха; 6 – лестница; 7 – подвеска датчика давления; 8- скоростная камера 1; 9 – лебедка; 10 – трос подвески импульсомера; 11 – прожектор; 12 - скоростная кинокамера; 13 – рама; 14 – шнуры для манипуляций с подвеской; 15 – заряд

подпора стенок емкости для увеличения ее стойкости к внутреннему подводному взрыву. Используемый песок был увлажнен и утрамбован. Схема установки показана на рисунке 27.

Эксперименты, поставленные по методике с подвижным полупогруженным препятствием импульсометром, в которых пузырьковая колонна поднималась от заряда вверх к поверхности и подвижному препятствию (см. главу 4), показали, что временное окно для регистрации параметров волны сжатия меньше, чем длительность процесса. Поэтому были проведены дополнительные эксперименты, в которых пузырьковая колонна поднималась от дна емкости с неподвижным препятствием к заряду, а выше него экранировалась конусообразным экраном, разводящим пузырьки на такую площадь, что средняя концентрация газовой фазы над зарядом была за пределами эффективных как для поглощения ГУВ, так и для проникновения ПД. В качестве неподвижного препятствия использовалась стальная плита с установленным заподлицо датчиком давления PS02, размещенная на демпфирующей подушке из гравия. В этих экспериментах заряд размещался выше, чем в опытах с подвижным препятствием, что снизило эффект движения емкости вверх. Схема эксперимента с неподвижным препятствием представлена на рисунке 28. Основная емкость была откалибрована в

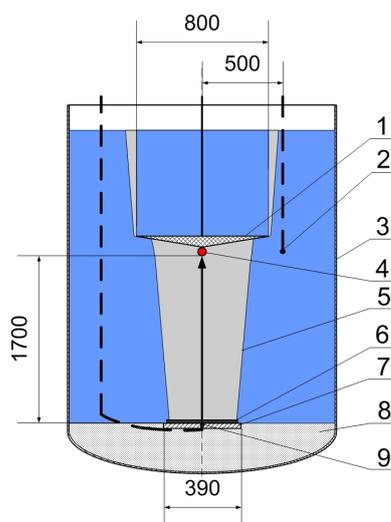


Рисунок 28. Схема эксперимента с неподвижным препятствием на дне емкости и пузырьковым экраном [109]: 1 – пузырьковый экран; 2 – датчик давления; 3 – емкость; 4 – заряд; 5 – пузырьковая колонна; 6 – генератор пузырьковой колонны; 7 – стальная плита; 8 – гравий; 9 – датчик давления

соответствии с процедурой, описанной в [1,4]. Для этого проведены взрывы зарядов ТНТ массой 5 г, 10 г, 20 г и 40 г. Одновременно регистрировалось давление датчиком, размещенным на уровне заряда на расстоянии 0.7 м от него.

На рисунке 29 показаны полученные записи давления для зарядов ТНТ различной массы. По записям давления была определена калибровочная зависимость для емкости $t_b=0.3m^{1/3}+0.0307m^{2/3}$ (см. рисунок 30), по которой вычислены необходимые для определения энергии пульсации константы. Для сравнения были также проведены опыты с алюминизированными составами следующих типов: 1:1, 1.5:1 и 2:1 и такими известными ВВ, как тритонал и гексоген. В таблице 11 представлены результаты определения удельных энергий ГУВ e_s и энергий пульсаций e_b , полученные экспериментально по записям давления от взрывов зарядов различной массы в сплошной воде. Также для сравнения приведена теоретическая максимальная удельная энергия взрыва $E_{теор}$. Как видно из таблицы 11, полученные значения близки к теоретическим кроме опытов с составом типа 2:1, при взрыве которого замечено существенное недореагирование алюминия с водой (на основе наблюдения большого количества всплывших непрореагировавших частиц).

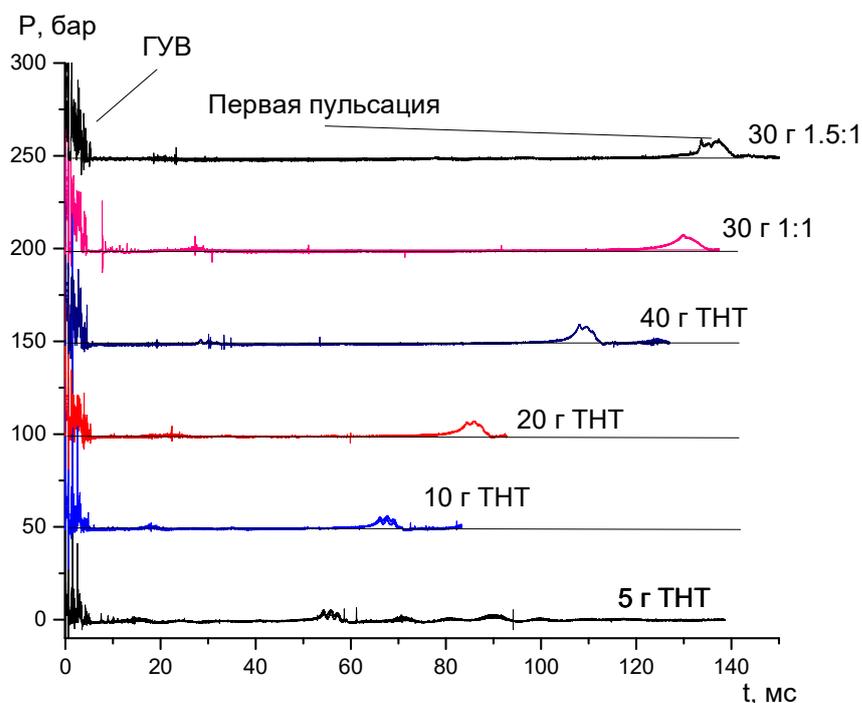


Рисунок 29. Записи давления при взрывах зарядов тротила различной массы и тройных составов типа 1:1 и 1.5:1

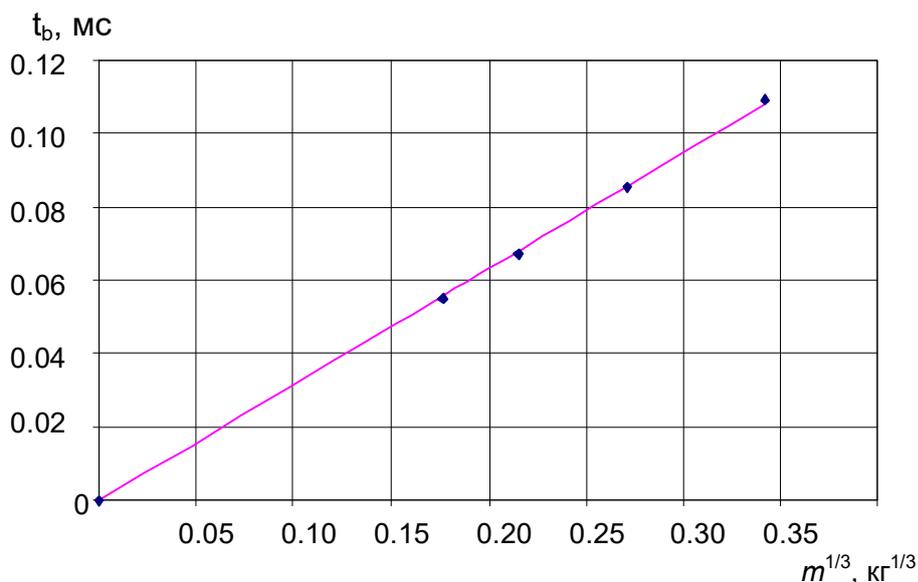


Рисунок 30. Калибровочная кривая для емкости, определенная по экспериментально полученным временам пульсаций при взрывах навесок ТНТ различной массы

Таблица 11. Удельные энергии ударной волны e_s , пульсации e_b и взрыва $E_{теор}$ для различных составов и ВВ

Состав	m, г	e_s ([3]), 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	
Трионал	30	1.20 (1.31)	4.77	4.97	—
Гексоген	30	1.24 (1.39)	3.16	4.40	—

3.4 Методика измерения действия волны сжатия на препятствие

Для измерения кинетической энергии, сообщенной волной сжатия преграде, использовано специально разработанное подвижное препятствие – импульсомер, описанное детально в работе [76]. Конструктивно импульсомер представляет собой металлическую трубу длиной 0.7 м и диаметром 0.4 м, к которой с одной стороны приварен прочный 40 мм стальной фланец (см. рисунок 31). Длина импульсомера была выбрана из условия, что длительность сигнала датчика за время циркуляции волны сжатия до поверхности и обратно будет порядка характерного времени реакции гетерогенного облака, а также из имеющихся ограничений глубины емкости. Поверхность импульсомера была покрыта

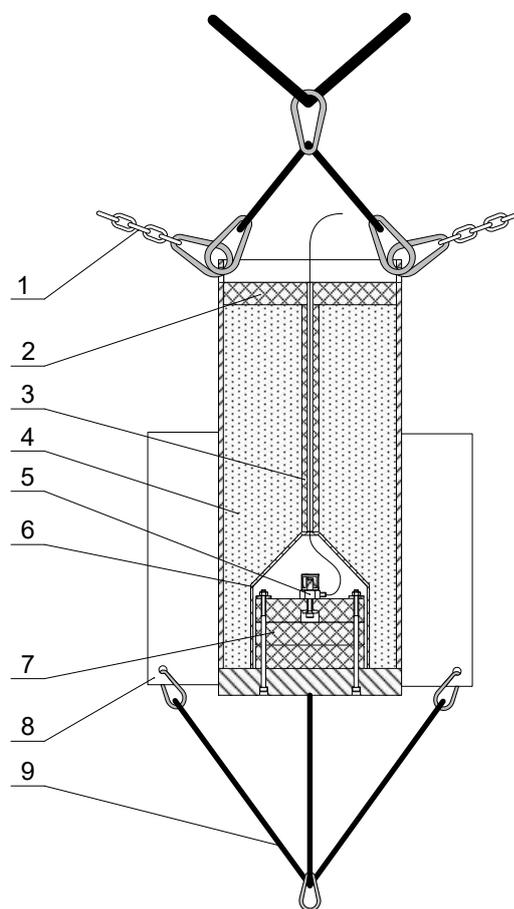


Рисунок 31. Подвеска импульсомера к раме [76]: 1 – цепь или трос, прикрепленные к раме; 2 – пенополиуретановая защитная крышка; 3 – защитная оболочка кабеля датчика; 4 – наполнитель из песка; 5 – пьезоакселерометр; 6 – пластмассовая защитная крышка подвески датчика; 7 – упругий резиновый блок; 8 – стабилизатор (4 шт.); 9 – элементы подвески заряда

гидрофобной краской для снижения трения. Внутри закреплен одноосевой пьезоакселерометр AP-40 (Глобал Тест, г. Саров). Датчик подключен к цифровому осциллографу через усилитель заряда L-Card LE-41.

Первые пробные эксперименты, в которых под импульсометром, погруженным в воду на 65 см, взрывался заряд в 30 г аммонита бЖВ, показали, что присутствует значительный вращающий момент при движении вверх. Поэтому в нижней части импульсомера приварены четыре стальных пластины – стабилизатора, постоянно погруженные в воду и ограничивающие поперечное движение конструкции. Предварительные опыты показали наличие значительных вибраций и недостаточную массу конструкции (сигнал акселерометра зашкаливало). Поэтому были приняты меры по демпфированию вибраций. Датчик ускорения установлен на 2 кг блок твердой резины (твердость 60А по Шору), прочно связанной с дном. Блок с датчиком накрыт пластиковой крышкой, а в оставшийся объем засыпан песок, залитый водой (см. рисунки 32, 33 и 34). Масса получившейся конструкции составляет 175 кг. В результате таких изменений сигнал акселерометра попадает в пределы измерений регистратора, а вибрации значительно снижаются. Собственная частота конструкции, которая составляет 2.1 кГц, фильтруется из полученного сигнала при помощи полосного частотного фильтра.

Для получения зависимости скорости движения импульсомера от времени сигнал акселерометра интегрируется. Повторное интегрирование дает зависимость модуля линейного перемещения от времени. Импульсомер подвешен к верхней части рамы при помощи толстого 18 мм металлического троса и цепей, которые играют роль ненагруженных ограничителей поперечного смещения. Таким образом, импульсомер может свободно передвигаться вверх и имеет ограниченное перемещение вбок (см. рисунок 31). Такая конструкция почти полностью исключает передачу вибраций емкости на импульсомер и обеспечивает правильное вертикальное движение устройства.

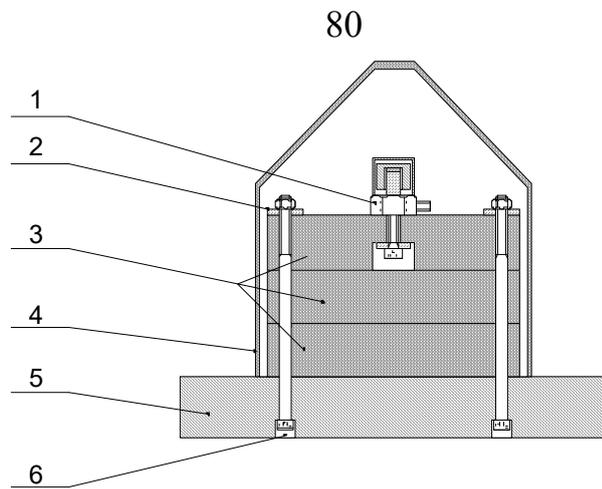


Рисунок 32. Схема крепления акселерометра к импульсомеру: 1 – датчик; 2 – прижимная шайба; 3 – блоки из твердой резины, разделенные фторопластовыми прокладками; 4 – защитная крышка; 5 – торцевой фланец импульсомера; 6 – отверстия герметизированы



а



б

Рисунок 33. Внешний вид импульсомера: а – крепление к раме над емкостью; б – общий вид

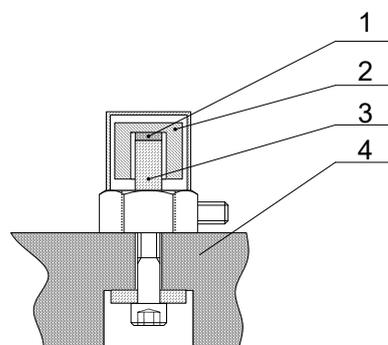


Рисунок 34. Устройство датчика – акселерометра: 1 – пьезоэлемент; 2 – грузик; 3 – корпус датчика; 4 – резиновый блок

3.5 Измерительная система

Регистрация давления в воде осуществляется двумя пьезодатчиками давления типа PS-02 (Глобал Тест, г. Саров). Сигналы датчиков подаются через усилитель заряда типа L - Card LE-41 на цифровой самописец. Регистрация сигналов происходит на частоте дискретизации АЦП в 1 МГц. Датчики размещаются в емкости следующим образом: один датчик всегда находится вблизи торцевой поверхности импульсомера для сверки начала регистрации сигналов датчика давления и акселерометра. Второй датчик располагается между зарядом и стенкой емкости. Датчики подвешиваются на толстостенных армированных резиновых шлангах, закрепленных верхней частью за раму емкости (см. п.п. 3.1). Конструкция подвески датчиков обеспечивает отсутствие паразитных шумов и надежное крепление (см. рисунок 19). Из-за свободной подвески появилось предположение, что датчик будет перемещаться вместе с водой при расширении газового пузыря при взрыве. Для проверки величины этого перемещения был проведен специальный опыт. Вместо датчика на торце шланга был закреплен светодиод, светящий вдоль внутренней полости вверх. При взрыве заряда свечение светодиода регистрировалось скоростной видеокамерой закрепленной неподвижно (при 1000 кад/с) (см. рисунок 27). Опыт показал, что в течение первых 20 мс не происходит смещения или перекрытия светового пятна даже в случае неидеального взрыва алюминизированного заряда. Существенное перемещение торца шланга было зафиксировано на 3 мс только в случае его размещения ближе 15 см от заряда. В проведенных экспериментах датчик располагается дальше.

3.6 Методика обработки сигналов датчиков

При проведении экспериментов инструментально регистрируются следующие параметры:

- Зависимость давления от времени на датчике D_1 , расположенном на уровне заряда на половине расстояния между датчиком и стенкой емкости. В некоторых

опытах, после монтажа датчиков и заряда, датчик оказывался на 10-15 см смещенным от этого положения, что учитывается при анализе сигнала.

- Зависимость давления от времени на датчике, расположенном вблизи нижнего торца импульсомера.

- Зависимость ускорения импульсомера от времени.

В экспериментах сравнивается действие подводных взрывов различных зарядов на импульсомер. Также, где это было возможно, сравнение проводится по полной выделившейся энергии. При сравнительном анализе подводных взрывов в качестве полной выделившейся энергии обычно рассматривается сумма энергии ударной волны и энергии пульсирующего пузыря. Для рассмотрения каждой составляющей полной энергии используются выкладки, приведенные в работах [2,4,132]. Обычно удельную энергию ГУВ e_s вычисляют по записи давления путем интегрирования квадрата давления по времени и вычисляют результат по формуле (2). Как выяснилось при проведении экспериментов, сигнал давления при неидеальном взрыве не всегда имеет вид монотонно спадающей кривой. В частности, при наличии пузырей в воде сигнал представляет собой серию импульсов переменной амплитуды. В подобных случаях интегрирование такой кривой не проводится вследствие невозможности определения постоянной интегрирования τ . В таких случаях сравнение проводится по другим параметрам. Здесь следует также сделать оговорку относительно места размещения датчика. Согласно рекомендациям Бьярнхольта [2] дистанция расположения датчика от заряда должна составлять

$$3.5 < \frac{R}{m^{1/3}} < 7, \quad (37)$$

однако в настоящей работе датчик расположен ближе минимальной рекомендованной границы. Это обусловлено размером имеющейся емкости и необходимостью располагать датчик на достаточном удалении от боковой стенки, чтобы иметь запас времени записи до момента прихода отраженной волны. Датчик располагается на расстоянии 0.37 – 0.70 м от заряда. Соответственно величина

$\frac{R}{m^{1/3}}$ находится в диапазоне

$$0.63 < \frac{R}{m^{1/3}} < 2.22. \quad (38)$$

Поэтому величину e_s следует рассматривать только при качественном сравнении действия различных зарядов. Значение энергии пульсации e_b определяется по формуле (3), представленной в работах [2,4] и с учетом выполненной (см. выше) калибровки емкости.

Также оценивалось положение датчика относительно границы расширяющегося пузыря. Согласно [2] максимальный радиус пузыря в неограниченном бассейне определяется как

$$r_b \approx \left[\frac{1.3Qm}{1+h/10} \right]^{1/3}, \quad (39)$$

где Q – теплота взрыва, m – масса заряда, h – глубина погружения заряда.

Так для заряда аммонита 6ЖВ массой 30 г на глубине 1.5 м радиус пузыря составляет $r_b = 0.52$ м. Поэтому, принимая в расчет, что датчик D_1 располагается на границе пузыря при идеальном взрыве и попадает внутрь пузыря при неидеальном, следует заключить, что данные о периоде пульсации могут быть неточными. В случае неидеального взрыва сложно говорить о точном периоде пульсации пузыря, так как реакция избыточного алюминия с водой продолжается в ходе и его расширения, и сжатия. Как показали первые эксперименты со взрывами неидеальных зарядов, процесс формирования импульса давления при первой пульсации сильно растянут во времени. Частично это происходит из-за месторасположения датчика, попадающего внутрь пузыря, а частично – из-за продолжающихся реакций. Вместе с тем, как видно из таблицы 11, определенные энергии согласуются как с теоретически определенными выше (см. таблицу 10), так и с известными из литературы. Принимая во внимание трудности количественного описания полной энергии взрыва, при сравнительном анализе экспериментов, проведенных при различных начальных условиях, приходится ориентироваться в основном на показания акселерометра, отражающие движение импульсомера.

При анализе сигналов датчиков давления определяются уровни максимального давления, импульс падающей волны сжатия и период первой

пульсации. При интегрировании профиля давления для определения импульса пределы интегрирования выбираются, начиная от фронта падающей волны до момента полного спада давления или до появления возмущений от отраженной волны, или до момента прихода волны разрежения. Два последних случая, естественно, снижается определенный таким образом полный импульс, однако получившаяся величина надежно показывает минимальную величину импульса, произведенного взрывом. Там, где это возможно, также определяется постоянная времени τ . Такой метод обработки результатов является достаточно грубым, однако для качественного сравнения результатов взрыва при изменении какого-либо параметра подходит. Принятые допущения вынужденные из-за ограниченных размеров бассейна. В случае, если импульс в одном из сравниваемых опытов явно выше, в то время как величина, полученная при интегрировании профиля давления снижена из-за интегрирования только части сигнала, при качественном анализе сравниваются импульсы, полученные при равных интервалах интегрирования выбранных участков. Таким образом, интервал интегрирования полного сигнала уменьшается до интервала в обрезанном разгрузкой или отраженной волной профиле давления другого сравниваемого опыта. Если один и тот же опыт фигурирует в нескольких качественных сравнениях, то интервал интегрирования выбирается для каждого случая отдельно.

Основными показателями, на которые можно опираться при сравнении результатов экспериментов, являются зависимости ускорения от времени. Они интегрируются один или два раза для получения соответствующих зависимостей скоростей и перемещений импульсомера от времени. На основе кривой скорость – время строится временная зависимость кинетической энергии. При этом учитывается действующая в обратном направлении сила тяжести, хотя ее вклад по сравнению со взрывом несущественен. Действие как ударной волны, так и последующей волны сжатия на импульсомер происходит в короткий промежуток времени до 10 мс. Перемещение за это время не превышает 10 мм. Дальнейшее движение происходит по инерции. Таким образом, механическое действие на

препятствие определяется максимальной кинетической энергией движения, набранной им при воздействии как ударной волны, так и сжимающейся гетерогенной среды вода + пузырьки воздуха. Зависимость кинетической энергии от времени в большинстве экспериментов имеет четкий максимум. Следует сделать оговорку, что после достижения импульсометром максимальной скорости воздействие на него сил, вызванных течениями при взрыве, не прекращается. Скорость может как поддерживаться движением обтекающей его воды, так и снижаться из-за эффекта обратного течения при пульсациях. Однако учет всех сил, приложенных к импульсометру после набора им максимальной скорости, в использованной постановке эксперимента невозможен. Для их учета необходимо использовать бассейн, не ограниченный стенками и имеющий значительно большую глубину, такую, чтобы временной интервал измерений не ограничивался временем разгрузки волн сжатия на поверхности воды. Эксперименты сопровождаются скоростной видеосъемкой. Всего используются две скоростные камеры, снимающие 420 кад/с и 1000 кад/с.

3.7 Характеризация пузырьковой колонны

Для исследования эффекта направленного действия неидеального взрыва разработано устройство для создания в воде колонны из равномерно распределенных всплывающих пузырьков. При создании такого устройства соблюдались следующие условия:

– Пузырьковая колонна должна быть цилиндрической формы, расположенной соосно емкости, заряду и импульсометру.

– Пузырьковая колонна должна быть максимально прозрачна для прохождения ГУВ и не оказывать эффекта снижения ее амплитуды. Известно, что при подводных взрывных работах для гашения гидроударных волн применяются воздушно-пузырьковые завесы [78]. При этом основной характеристикой таких завес является удельный расход воздуха из распределительной придонной трубы с отверстиями (на погонный метр завесы). В работе [123] было указано что эффект

гашения ГУВ наступает в случае удельного расхода $0.24 \text{ м}^3/\text{мин}\cdot\text{м}$. При этом величина снижения давления:

$$B_p = \frac{P_1 - P_0}{P_{after} - P_0} = 6, \quad (40)$$

где P_1 – амплитуда падающей волны, P_{after} – амплитуда волны, прошедшей за экран, P_0 – гидростатическое давление. При воздействии ГУВ на пузырьки значительная часть энергии тратится на их сжатие. В работе [124] было показано, что для мелких пузырьков с диаметром до миллиметра время охлаждения после сжатия сопоставимо с общим временем сжатия. Это означает что, при сильном сжатии часть тепла будет очень быстро передаваться окружающей воде, снижая амплитуду фронта ГУВ. Теплопередача от пузырей большего размера намного медленнее, так что потери энергии длительной волной сжатия будут много меньшими. К тому же, когда волна движется вдоль колонны из пузырьков, акустическая скорость в которой существенно меньше, чем в сплошной воде, волны сжатия по окружающей воде распространяются быстрее, обгоняя волну в пузырьковой среде, из-за чего ударно-сжатая вода вокруг колонны разгружается внутрь последней, снижая потери энергии. При большем размере пузырей среднее давление внутри колонны уравнивается с внешним давлением в течение более длительного времени за счет большего линейного перемещения границ пузырьков. Поэтому мощность волны сжатия, расходуемая против сил поверхностного натяжения при распространении вдоль пузырьковой колонны, меньше в случае пузырей большего размера. Из опытов гашения ГУВ пузырьковыми завесами, описанных в литературе, известно, что основным параметром, определяющим эффективность демпфирования, является внутренняя энергия газа, содержащаяся в 1 м^3 завесы. В работе [78] было указано, что если падающая волна имеет удельную энергию

$$E_0 \gg \frac{P_0 \varphi}{\gamma - 1} h, \quad (41)$$

где h – ширина завесы, φ – объемное содержание пузырей в воде, γ – показатель адиабаты воздуха, то снижения амплитуды не происходит. В описанном

эксперименте энергия волны, падающей на завесу, составляет порядка $10^3 - 10^5$ Дж/м².

– Диаметр пузырьковой колонны должен составлять около пяти характерных размеров заряда (диаметров шара, в который могла бы быть сформована используемая смесь). Такой размер выбран из соображения, что течение ПД на первых пяти калибрах от заряда преимущественно ламинарное, и смешение будет наиболее эффективным в пузырьковом слое, равном этому радиусу.

3.8 Генератор пузырьковой колонны

Конструкция генератора пузырьков представлена на рисунке 35. Подобная конструкция обеспечивает наиболее равномерное и воспроизводимое наполнение колонны пузырьками и одновременно проста в изготовлении. Генератор пузырьков представляет собой несущую крестовину из деревянных реек, на которой закреплен по спирали 1/2" ПВХ-шланг длиной 4.5 м, перфорированный 250 отверстиями с шагом 1.5–2.0 см. Эксперименты с различным типом отверстий показали, что подходящие по размерам (до 15 мм) и постоянные по форме пузыри образуются в случае, когда в шланге сделаны продольные прорезы длиной 4-5 мм (см рисунок 36). В случае круглых отверстий, истечение воздуха происходит в виде струй с последующим распадом на отдельные, различные по размеру пузыри. В случае же продольных прорезей, заостренные края отверстий способствуют срыву отдельных пузырей без образования струй.

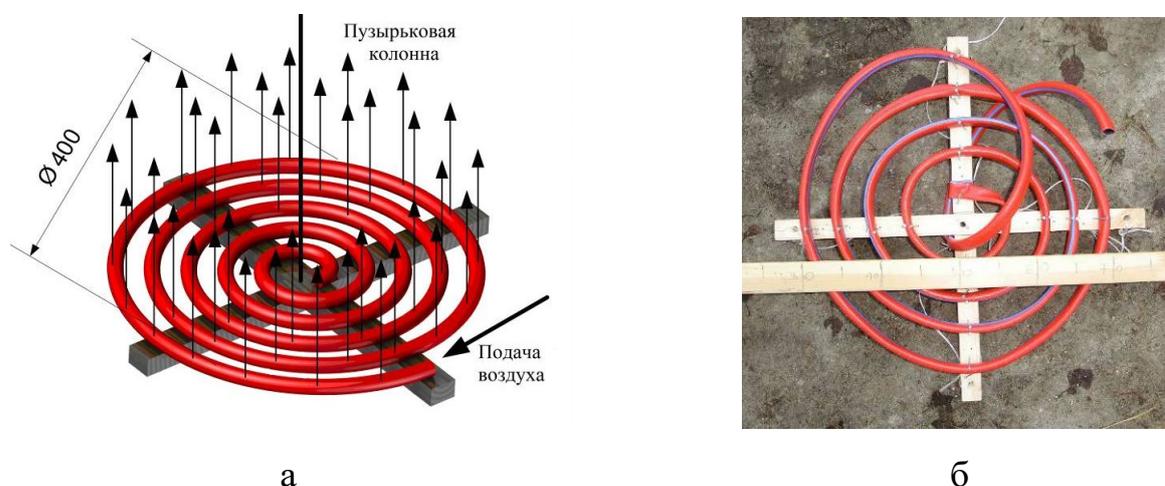


Рисунок 35. Генератор пузырьков [125]: а – схема; б – фотография

3.9 Режимы подачи газа

Максимальный расход воздуха в генераторе пузырьков составляет 120 л/мин. При таком расходе наполнение пузырями колонны наиболее равномерно, а показатель снижения давления ГУВ $B_p < 6$ в соответствии с величиной расхода воздуха, указанной в работе [123]. Для воспроизводимости режимов подачи воздуха динамическое давление газа в расходной трубке контролируется манометром (см. рисунок 37). Для равномерной подачи воздуха из ресивера компрессора при снижении давления в нем давление подачи газа контролируется газовым редуктором. Расход воздуха в генераторе пузырьков регулируется дополнительным вентилем. Подача воздуха в генераторе во всех опытах осуществляется через армированный шланг постоянной длины, проложенный по

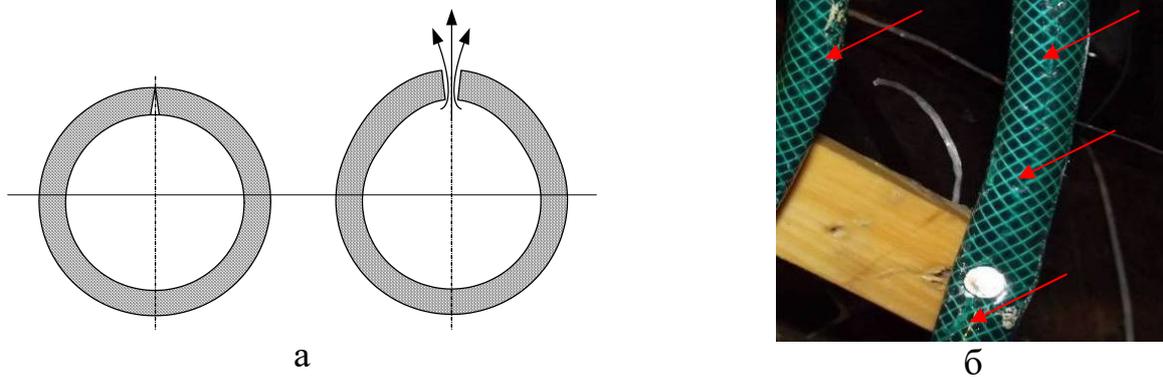


Рисунок 36. Прорези в генераторе пузырьков: а – поперечный чертеж в сомкнутом и раскрытом при подаче воздуха положениях; б – фотография прорезей

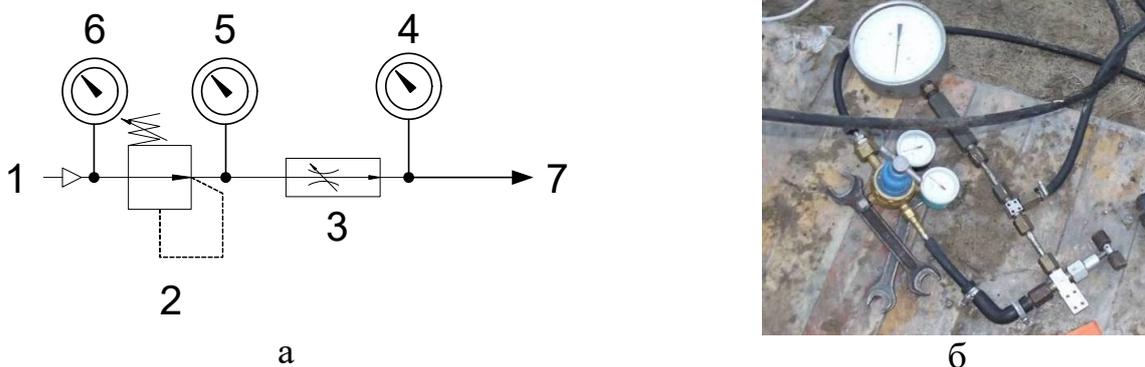


Рисунок 37. Система подачи воздуха в генератор пузырьковой колонны: а – схема: 1 – воздух при давлении 8 атм от компрессора, 2 – газовый редуктор, 3 – вентиль для контроля потока, 4 – контрольный манометр, 5 и 6 – контрольные манометры редуктора, 7 – шланг к генератору пузырьков; б – общий вид

постоянному маршруту для обеспечения постоянного сопротивления во всех опытах.

Эксперименты проводятся при трех различных значениях объемного содержания пузырьков в воде (соответственно режимы 1, 2 и 3). Режим 1 соответствует наименьшему возможному расходу воздуха (6 кПа по манометру 4 на рисунке 37), при котором происходит равномерное наполнение пузырьками колонны (см. рисунок 38а). Режим 2 является средним и соответствует подаче воздуха с динамическим давлением 24 кПа (см. рисунок 38б). Режим 3 соответствует максимальному расходу при динамическом давлении 54 кПа на манометре 4 (см. рисунок 38в). Температура подаваемого воздуха во всех опытах постоянна (5°C) и равна температуре воды в емкости.

3.10 Исследование особенностей пузырьковой колонны

В работах [126-130] исследовалось поведение единичного всплывающего пузырька воздуха в зависимости от его характеристик и параметров окружающей среды. Было определено, что движение пузырька может быть спиралевидным или зигзагообразным, а его форма меняется в зависимости от диаметра: для пузырьков малого диаметра, с преобладанием силы поверхностного натяжения, сохраняется сферическая форма [127], при увеличении диаметра пузырек деформируется и приобретает форму эллипса [128]. Скорость всплытия пузырька, полученная в

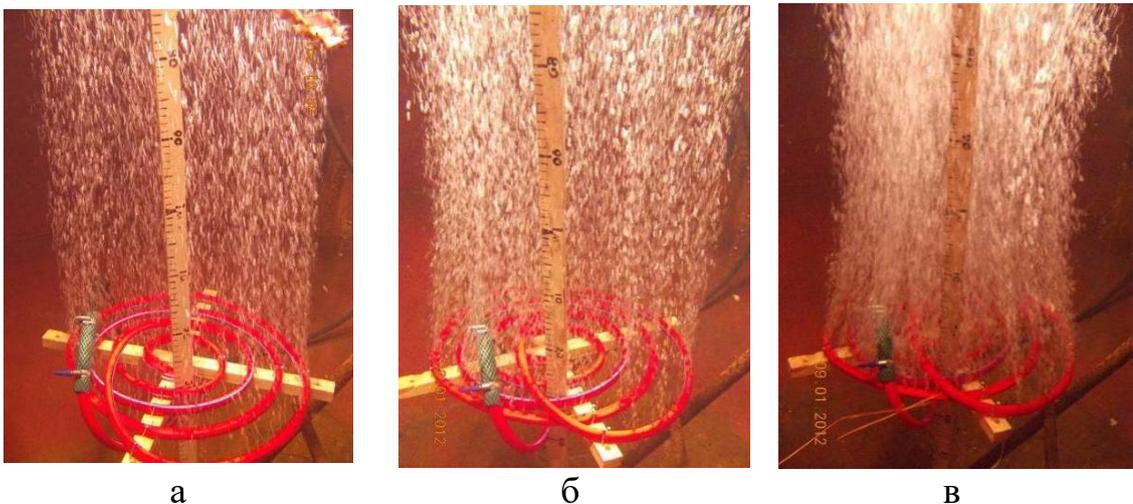


Рисунок 38. Режимы подачи газа [125]: а – 1-й режим (наименьший расход); б – 2-й режим (средний расход); в – 3-й режим (наибольший расход)

работах [129,130], так же зависит от его диаметра и варьируется от 0.2 м/с до 0.6 м/с. Однако поведение пузырьков в колонне существенно отличается от поведения единичного пузырька. Известны исследования поведения пузырьковых течений в неограниченном объеме [130,131], в которых была выявлена заметная неравномерность профиля скоростей течения и локального объемного газосодержания в поперечном сечении. Было установлено, что к центру колонны скорость пузырьков и локальное объемное газосодержание увеличивается. Для исследования эффектов, влияющих на форму пузырьковой колонны, от различных факторов, а также для отработки конструкции генератора пузырьковой колонны была изготовлена вертикальная емкость для воды объемом 0.7 м³, в которой на одной из стенок были установлены прозрачные окна для наблюдения (см. рисунок 39). Высота емкости составила 1.7 м, а диаметр в наиболее узкой цилиндрической части 0.6 м. Таких размеров достаточно, чтобы внутри полностью умещалась колонна пузырьков, генерируемая в основной емкости. Размеры колонны составляют 40 см в диаметре основания, а сама колонна – до 1.5 м в высоту. На расстоянии 20 см от дна располагаются трубки подачи воздуха с отверстиями для выхода пузырьков. Путем комбинирования числа отверстий на единицу площади колонны, их диаметра, а также расхода и давления нагнетаемого воздуха достигается равномерное заполнение колонны пузырьками заданных размеров. Контролируется размер, количество пузырьков на единицу



а



б

Рисунок 39. Емкость с окнами наблюдения для характеристики пузырьковой колонны: а – общий вид; б – вид изнутри с размещенным на дне генератором пузырьков

объема воды, их форма и траектории всплытия. Контроль проводится инструментально с помощью скоростной видеосъемки. Чтобы предотвратить слияние маленьких пузырьков в большие, в воду добавляется некоторое количество ПАВ (бытовой детергент). Экспериментально подобрано минимальное количество ПАВ (0.01 вес.%), необходимое для обеспечения постоянных размеров пузырей в ходе их всплытия. Взрывные эксперименты также проводятся с добавлением ПАВ. Используется та же система подачи газа, что и в основных опытах (см. рисунок 37). Измерения скорости всплытия и размеров пузырей осуществляются при заданных режимах подачи воздуха (режимы 1, 2 и 3). Определение объемного содержания пузырьков в воде проводится путем измерения уровня жидкости в емкости в момент стабильной работы генератора пузырьковой колонны. Устройство, представленное на рисунке 40, показывает отметку уровня воды с внутренней стороны верхнего окна. Прямоугольный профиль фиксируется на окне таким образом, что образуется канал, защищающий поверхность воды от волнения при работающем генераторе пузырьков. Снижение волнения в жидкости достигается благодаря покрытию поверхности воды маслом. Включение генератора пузырьков сопровождается повышением уровня воды в индикаторе за счет вытеснения воды пузырьками. Зная площадь поперечного сечения, легко определить объем занятый пузырьками в колонне.

Влияние размеров емкости на колонну всплывающих пузырьков в основной рабочей емкости определяется с помощью скоростной видеосъемки пузырькового генератора. Максимальная высота колонны при этом изменяется от 1.7 м до 3.0 м.



Рисунок 40. Устройство для определения уровня воды и объемного содержания пузырьков в колонне

Проведенные наблюдения демонстрируют следующие особенности всплывающих пузырьков:

- Размеры пузырьков не зависят от давления подачи воздуха в отличие от указанного в [78], где генератор пузырьков имеет круглые отверстия, через которые воздух истекает струйно, уже начиная с расхода $q_l \geq 50$ л/мин. После истечения струи сразу же распадаются на отдельные пузырьки. В случае, когда истечение происходит через щели с резкими краями, струи не образуются даже при расходе в 10 л/мин (режим 1), а средний размер пузырька составляет 4 - 5 мм. Такой размер меньше заранее выбранного (10 мм), однако в несколько раз превышает пороговое значение в 1 мм, которое приводит к существенному снижению энергии ГУВ. Большим расходам в режимах 2 и 3 (48 л/мин и 120 л/мин соответственно) соответствует средний размер пузырьков, составляющий 10 мм.

- 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.

- Большинство пузырьков имеет линзоподобную форму (см. рисунок 41).



а

б

в

Рисунок 41. Пузырьки, образующиеся при различных режимах подачи воздуха: а – режим 1; б – режим 2; в – режим 3

Среднее соотношение диаметра пузырька к высоте составляет $D/h \approx 2.5-4.0$ для режимов 2 и 3 и 1.0-2.0 для режима 1 соответственно. Ориентация таких сплюснутых пузырьков постоянна и направлена поперек направления движения. Ясно, что имеет место снижение давления на периферии пузырька за счет эффекта Бернулли в набегающем потоке воды (см. рисунок 42). Таким образом, при такой анизотропии пузырьковой колонны, площадь перекрытия сечения пузырьками будет больше в направлении распространения ГУВ. Влияние анизотропии пузырьковой колонны на параметры волны сжатия в работе не рассматривалось, однако такие эксперименты стоит провести в будущем.

- Когда колонна пузырей всплывает, формируется вихревое движение воды в емкости, рождающее вертикальное восходящее течение в центре и нисходящее у стенок. Скорость всплытия пузырьков не постоянна и снижается от центра, где течение наиболее сильное, к периферии колонны (см. таблицу 12). Скорости всплытия пузырьков в малой и большой емкостях представлены в таблицах 12 и 13 соответственно. Сравним полученные скорости всплытия с данными работы [130], в которой представлена экспериментальная зависимость скорости всплытия единичного пузырька в воде от его диаметра. Авторы [130] сообщают, что с ростом

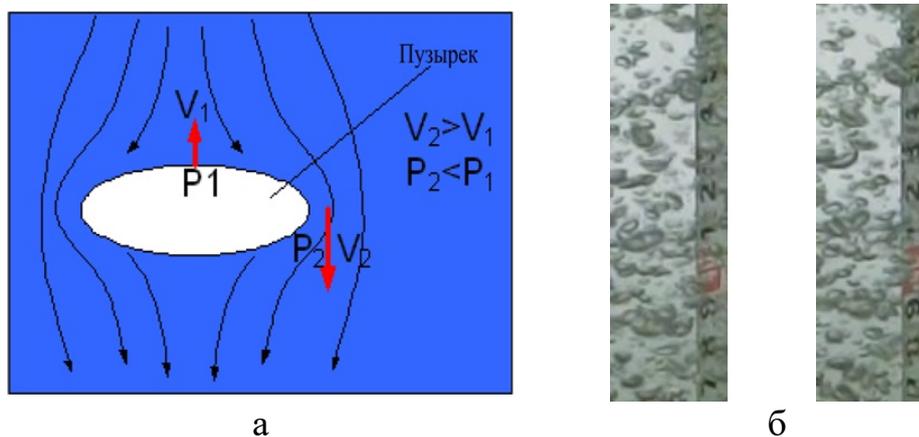


Рисунок 42. Реристрация всплытия пузырьков: а – схема, объясняющая эффект растяжения пузырька в поперечном направлении при всплытии, V_1 и V_2 – скорости потоков, P_1 и P_2 – давление внутри пузырька и снаружи в боковом примыкающем слое воды; б – кадры скоростной съемки (справа линейка для измерения расстояния, пройденного пузырьком)

диаметра пузырька (до 1.5 мм) наблюдается увеличение скорости всплытия, соответствующее вязкому обтеканию во внестоксовской области чисел Рейнольдса ($1 < Re < 500$). Далее наблюдается падение скорости всплытия, связанное с резкой деформацией (сплющиванием) пузырей и связанного с этим ростом гидравлического сопротивления. В этом случае происходит переход от вязкого сопротивления к сопротивлению формы (при диаметре до 5 мм). За некоторым минимумом скорости всплытия следует ее возрастание с увеличением объема пузыря. Скорость всплытия пузырьков не превышает 0.4 см/с. Однако съемка всплытия пузырей в настоящей работе показала на порядок большие скорости всплытия, чем указанные в [130] для единичных пузырьков (см. таблицу 12). В работе [129] исследовалась скорость поднятия пузырьков в воде и водных растворах при больших числах Рейнольдса. Сравнивались экспериментальные и теоретические результаты для пузырьков радиусом до 1.5 мм. Скорость всплытия не превышала 0.3 м/с и увеличивалась с ростом

Таблица 12. Измеренные скорости всплытия пузырьков в пузырьковом канале в большой емкости при среднем расходе воздуха в 30 л/мин

Давление, в подающей трубе, кПа	Скорость всплытия пузырьков, м/с	
	центр канала	периферия
79	0.94 – 1.35	0.57
55	1.00 – 1.35	0.48 – 0.58
42	1.00	0.42

Таблица 13. Параметры пузырьковой колонны при различных режимах подачи воздуха в малой емкости [125]

Режим расхода воздуха	Динамическое давление в подающей магистрали, кПа	Расход воздуха, л/мин	Скорость всплытия пузырьков, м/с	Объемное содержание пузырьков в воде	Средний размер пузырьков, мм	Среднее отношение диаметра к высоте пузырька
1	6	10	0.35	0.004	4 – 5	1.0 – 2.0
2	24	48	0.60	0.010	10	2.5 – 4.0
3	54	120	0.60	0.026	10	2.5 – 4.0

радиуса пузырька. Это согласуется по порядку величины с полученными в этой работе данными о скоростях всплытия.

Форма полученной пузырьковой колонны близка к цилиндрической, имеющей 40 см в диаметре основания. Однако на первых 30 см над генератором поперечный размер колонны несколько уменьшается (на 5-10%). Это связано с тем, что при наборе пузырьками скорости, давление между ними снижается за счет эффекта Бернулли, что вызывает их сближение. По мере дальнейшего всплытия поперечный размер колонны несколько увеличивается из-за взаимного расталкивания пузырьков, т.к. их объем увеличивается за счет снижения, по мере всплытия, гидростатического давления (см. рисунок 38в). Однако учитывая, что использованная в основных экспериментах высота пузырьковой колонны не превышала 2 м, проводя расчет, этим эффектом объемного содержания пузырьков можно пренебречь.

3.11 Пузырьковый экран

В экспериментах генератор пузырьковой колонны размещается под импульсомером (см. рисунок 43). В таких условиях диаметр пузырьковой колонны несколько больше. Вследствие чего пузырьки обтекают препятствие и всплывают вдоль его стенок. Наличие газовых пузырьков у стенок импульсомера может привести к преждевременной разгрузке волны сжатия, взаимодействующей с его передним торцом, и, соответственно, снизить время эффективной регистрации импульса сжатия. При этом может снизиться зарегистрированная величина механического импульса, приобретенного импульсомером. Для того чтобы определить, насколько велико влияние пузырьков у боковых стенок, проведен специальный эксперимент, в котором на расстоянии 17 см ниже торца закреплен легкий полиэтиленовый экран, отводящий всплывающие пузырьки в сторону на 25 см (см. рисунок 44). Стенки экрана представляют собой конус с углом вершины 160° обращенный вниз, что способствует равномерному отводу пузырьков во все стороны, а объемное содержание пузырьков выше экрана таково, что не оказывает влияния на амплитуду ГУВ.

В случае постановки эксперимента (см. рисунок 28), когда пузырьковый генератор размещался на дне резервуара на неподвижном препятствии, пузырьковый экран устанавливался непосредственно над зарядом, оставляя, таким образом, выше него столб сплошной воды.



а



б

Рисунок 43. Пузырьковый экран: а – общий вид; б – положение экрана под импульсометром

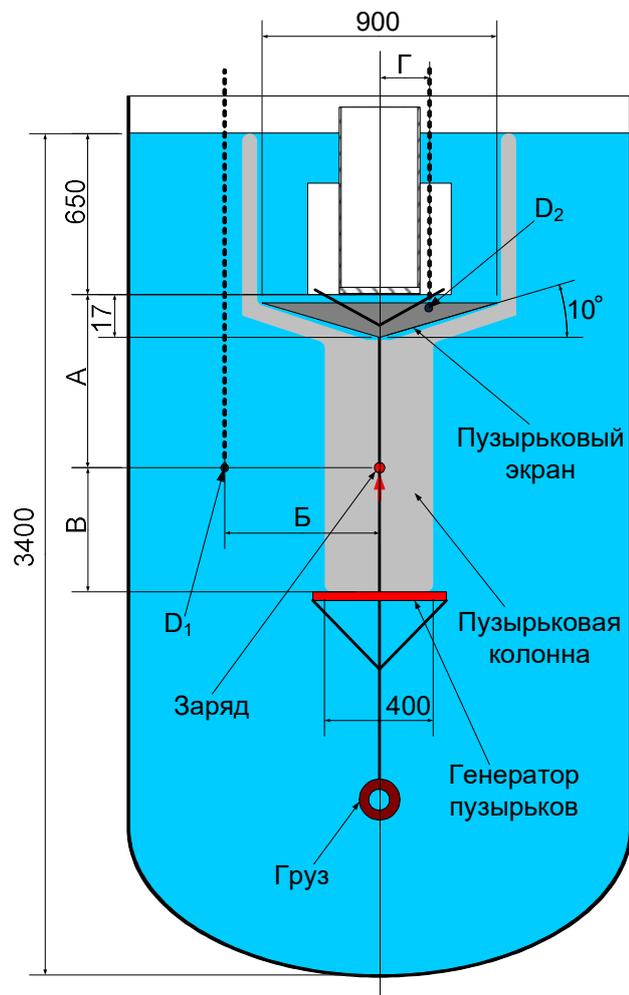


Рисунок 44. Схема проведения эксперимента с пузырьковым экраном – отражателем

ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК АЛЮМИНИЯ И СВОЙСТВ ПУЗЫРЬКОВОГО КАНАЛА НА ПАРАМЕТРЫ ПОДВОДНОГО ВЗРЫВА

В этой главе представлены результаты экспериментальных исследований подводных взрывов идеально и неидеально детонирующих зарядов в сплошной воде и в воде, содержащей пузырьки воздуха. Регистрировались параметры волн сжатия. Показан эффект направленного распространения взрывной волны вдоль пузырьковой колонны от заряда к препятствию. Также обсуждается механизм неидеальных взрывов высокометаллизированных составов, в том числе взрывы в гетерогенной среде.

4.1 Взрыв идеального ВВ в воде

Из литературы известно [4], что энергия пульсации, в числе прочих начальных условий подводного взрыва, зависит также и от геометрии водоема. Поэтому для проведения количественного и качественного сравнения взрывов идеальных и неидеальных ВВ необходимо знать параметры действия известных ВВ в конкретном водоеме, используемом для эксперимента. Более того, заранее неизвестно влияние массивного препятствия – импульсомера, размещенного в емкости. Поэтому необходимо провести реперные эксперименты со взрывами хорошо описанных в литературе ВВ в той же постановке, в которой исследуются неидеальные высокометаллизированные взрывчатые системы. В качестве референсных ВВ были выбраны аммонит 6ЖВ, ТНТ, гексоген и тритонал, параметры взрывов которых в сплошной воде инструментально зарегистрированы на установке, показанной на рисунках 27 и 44. В экспериментах варьировалась глубина погружения заряда (от 135 см до 205 см от поверхности воды). Пример полученных результатов эксперимента, проведенного в постановке как на рисунке 27, показан на рисунке 45. В нижней половине рисунка приведены профили давления до момента полной разгрузки. Время указано от момента инициирования. В верхней половине приведен сигнал акселерометра и построенные путем его обработки зависимости от времени: набранной импульсомером скорости, кинетической энергии и его абсолютного перемещения.

Полученные сигналы использованы для определения максимальных уровней давления на обоих датчиках, максимального значения кинетической энергии импульсомера, а также его максимальное перемещение и скорость. Для сравнения полученные результаты представлены в таблице 14.

На основе сигнала нижнего датчика давления D_1 определена постоянная затухания τ . По формуле (2) определяется энергия ГУВ e_s , значения которой также занесены в таблицу 14.

4.1.1 Взрыв в сплошной воде

Полученные энергии ГУВ (см. таблицу 14) качественно совпадают с литературными данными [110], однако для зарядов аммонита данные полученные от взрывов на различной глубине, хотя и совпадают между собой (0.64 МДж/кг и 0.77 МДж/кг) значительно ниже данных для ТНТ из [110], в то время как теплота взрыва у обоих ВВ близкая. Такое снижение объясняется низкой плотностью заряда аммонита и, соответственно, низкой скоростью детонации. Кроме того, влияние оказывает также довольно близкое расположение к заряду датчика давления, вне рекомендуемых расстояний, указанных в [2]. В эксперименте

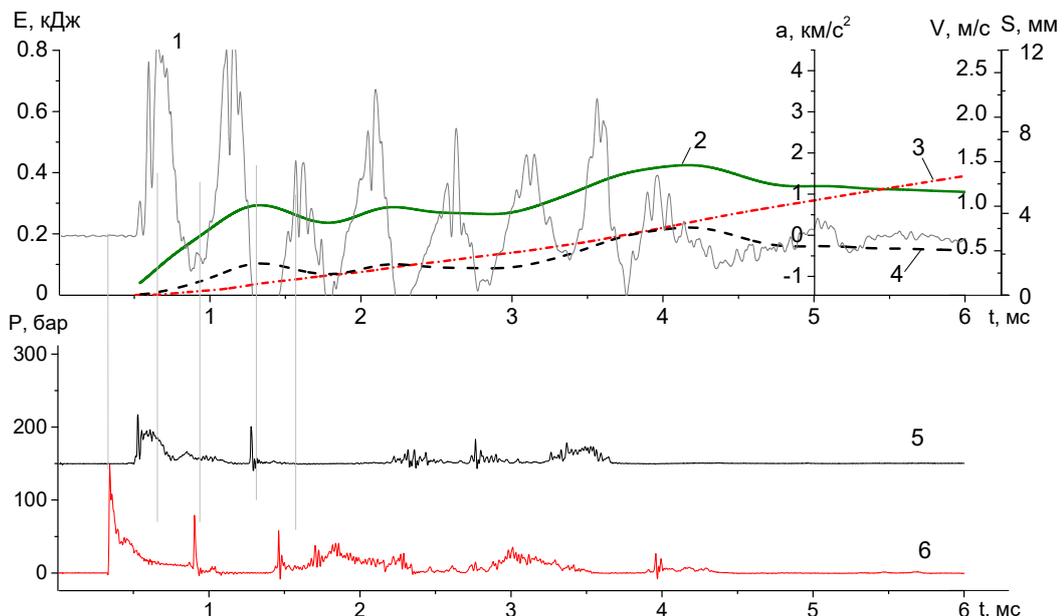


Рисунок 45. Результаты эксперимента с зарядом 30 г БЖВ на глубине 135 см в сплошной воде [125]: 1 – ускорение; 2 – скорость; 3 – перемещение; 4 – кинетическая энергия; 5 – давление на датчике D_2 ; 6 – давление на датчике D_1

Таблица 14. Сводная таблица результатов экспериментов [109, 125]

№	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	Тритонал	Гексоген	1:1	1:1
Режим подачи воздуха	-	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	-	0.5↓	-	-	0.5↓	0.5↓	0.5↓	0.5↓	0.5↓	0.5↓	0.55↓	0.5↓	↔	0.2↑	-	-	-	0.5
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
$I_{1\max}$, бар·с	0.045	0.033	0.060	0.043	0.056	0.046	0.029	0.035	0.049	0.047	0.044	0.040	0.056	0.051	0.030	0.054	0.057	0.062
$I_{2\max}$, бар·с	0.025	0.023	0.012	0.031	0.044	0.037	0.024	0.013	0.02	0.023	0.021	0.030	0.021	0.028	0.017	0.028	0.030	0.052
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
$V_{1\max}$, м/с	1.02	1.25	0.52	1.10	1.49	1.8	1.34	1.84	1.92	1.27	1.68	1.22	4.08	2.05	0.70	1.20	1.34	1.17
$V_{2\max}$, 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
$E_{k\max}$, Дж	220	290	102	236	605	461	222	663	513	369	389	341	1713	680	132	264	385	427

Примечание: $I_{1\max}$ – полный импульс на датчике D_1 , $I_{2\max}$ – полный импульс на датчике D_2 , e_s – удельная энергия ГУВ, $E_{k\max}$ – максимальная кинетическая энергия, $V_{1\max}$ – максимальная скорость импульсомера на первой стадии, $V_{2\max}$ – 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 44

приведенное расстояние между датчиком и зарядом составляет 0.64, в то время нижняя граница рекомендуемого диапазона – 3.4.

Для проверки корректности измерений давления ГУВ проведено сравнение профиля, полученного в эксперименте расчетной кривой затухания давления за фронтом в диапазоне времени $0 < t < \tau$. Функция затухания $P(t)$ вычисляется по формуле из [120]:

$$P(t) = P_{\max} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (42)$$

На рисунке 46 рассчитанная кривая затухания для ТНТ построена совместно с экспериментальным профилем давления, полученным при взрыве аммонита БЖВ. Видно, что вначале экспериментальная кривая спадает быстрее из-за влияния воздушных включений в оболочке, однако затем идет несколько выше теоретической зависимости. Это связано с цилиндрической формой заряда с удлинением 3. Следует отметить, что обе зависимости достаточно близки и дают близкие значения удельной энергии ГУВ.

В случае взрыва гексогена, удельная энергия ГУВ e_s несколько ниже литературных данных. Причиной является цилиндрическая форма заряда и погрешность его изготовления, неизбежно возникающая при работе с зарядами малой массы.

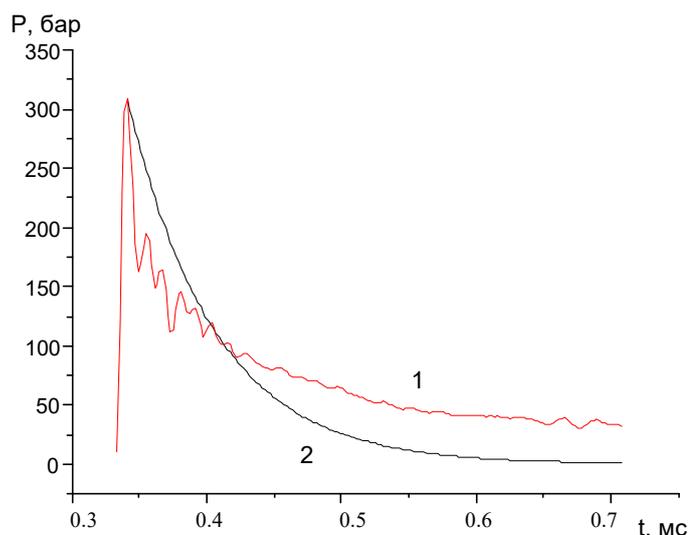


Рисунок 46. Сравнение профилей затухания УВ при взрыве аммонита в сплошной воде на глубине 205 см: 1 – эксперимент; 2 – расчет [110]

При взрыве тритонала удельная энергия ГУВ e_s существенно меньше, чем в [110], 0.39 МДж/кг против 1.31 МДж/кг. Это можно объяснить плохим качеством ВВ и низкой плотностью состава. Кроме того, при снижении размеров весовая доля материала оболочки заряда выше, и, следовательно, она эффективнее демпфирует УВ. Удельная энергия УВ оказалась ниже, чем у аммонита.

Анализ результатов измерения параметров движения импульсомера показал, что во всех экспериментах на сигнале акселерометра присутствуют периодические колебания. Частота этих колебаний одинакова во всех опытах и близка к 2.1 кГц. Проведенные измерения собственной частоты упругих колебаний дна корпуса импульсомера показали тот же результат – 2.1 кГц. Это означает, что оно, несмотря на значительную толщину, под воздействием волн сжатия в жидкости ведет себя как упругая мембрана. Поэтому к сигналу акселерометра был применен полосный фильтр 2.1 кГц. Заметно, что процесс разгона импульсомера происходит в две стадии. Этот эффект наблюдается и в остальных экспериментах.

Первая стадия набора скорости связана с воздействием ГУВ. Вторая стадия является следствием действия импульса давления, рожденного в воде процессом расширения пузыря с ПД. Максимумы обеих стадий набора скорости следуют с примерно одинаковой задержкой во всех опытах. В среднем донабор скорости за счет расширения составляет 33-60 % от скорости, набранной при воздействии ведущей ГУВ. Примечательно, что в случае взрыва тритонала, донабор скорости во время второй фазы движения почти в два раза интенсивнее в сравнении с первой фазой, чем при взрыве аммонита или тротила. Это означает, что дореагирование алюминия с водой влияет на динамику расширения пузыря, что и отражается на движении импульсомера. Таким образом, характер движения импульсомера косвенным образом отражает соотношение между вкладом в полную энергию взрыва обоих процессов: как ГУВ, так и энергии пульсации пузыря продуктов.

При взрыве аммонита на большей глубине (см. опыт 3) амплитуда ударной волны изменяется в соответствии с расчетной кривой затухания. Полное

перемещение и скорость импульсомера здесь существенно ниже, чем в опытах с более близким расположением заряда. Обращает на себя внимание более высокий донабор скорости импульсомером в ходе второй фазы разгона (92 %). Это означает, что при удалении заряда от препятствия вклад затухающей ударной волны снижается в сравнении с энергией пузыря. Таким образом, можно сделать вывод, что для такой постановки эксперимента, с учетом ожидаемого характерного размера пузыря порядка 1.0-1.5 метров при неидеальных зарядах выбранная для основной серии опытов глубина погружения заряда относительно препятствия, равная 0.7-0.8 м, является оптимальной.

4.1.2 Взрыв в барботированной воде

Для определения влияния колонны пузырьков на гидродинамическую картину распространения волн сжатия в воде при взрыве ВВ проведен опыт 2, в котором заряд 30 г аммонита взрывается в окружении пузырьковой колонны на глубине 1.35 м. Генератор пузырей располагается ниже заряда на 0.5 м и настроен на 2-й режим расхода воздуха. В остальном схема эксперимента соответствует опыту 1, записи ускорения и давления в котором представлены на рисунке 45.

Сигналы, полученные в ходе опыта 2, представлены на рисунке 47. Обращает на себя внимание значительное в сравнении с опытом 1 ослабление сигнала датчика давления, установленного вблизи торца импульсомера. Этот датчик попадает в область с пузырьковой средой, а значит, имеет место эффект демпфирования ГУВ. Максимальная амплитуда на этом датчике ниже: 50.5 бар против 68.0 бар в опыте 1. Датчик D_1 , расположенный напротив заряда, также показывает некоторое снижение амплитуды в сравнении с опытом в сплошной воде (117.2 бар против 148.4 бар). Это объясняется тем, что ГУВ подходит к датчику, минуя 20 см слой пузырьковой среды. Волны сжатия, прошедшие через пузырьковую колонну, имеют большую длительность, чем в случае сплошной воды. Определить момент появления максимального давления, а значит, и период пульсаций, в случае с пузырьками невозможно. Сигнал представляет собой череду периодических импульсов. При наличии пузырьковой среды на пути ГУВ

относительно гладкий сигнал спада давления после фронта УВ состоит из ряда коротких импульсов. При сглаживании такого сигнала путем усреднения по 20 точкам форма спада становится похожа на спад давления за фронтом в сплошной воде. Природа замеченных импульсов связана с многократными отражениями УВ в области, где присутствуют пузырьки. Кроме того, из-за возможной неравномерности средней плотности пузырьковой колонны (например, из-за обтекания заряда пузырьками при их всплытии) возникают более низкоплотные участки в сравнении со средней плотностью барботированной воды. ГУВ при прохождении этих низкоплотных областей замедляется. Поэтому распространение УВ не является сферически симметричным и представляет собой набор взаимодействующих волн, вышедших в сплошную воду в разное время. За счет столкновений УВ в области чувствительного элемента датчика и появляются на записи давления резкие импульсы малой длительности.

Как видно при сравнении сигналов акселерометра, в опыте 2 амплитуда собственных колебаний дна импульсомера снижается при сохранении частоты 2.1 кГц. Это происходит из-за того, что импульсомер задемпфирован сжимаемой

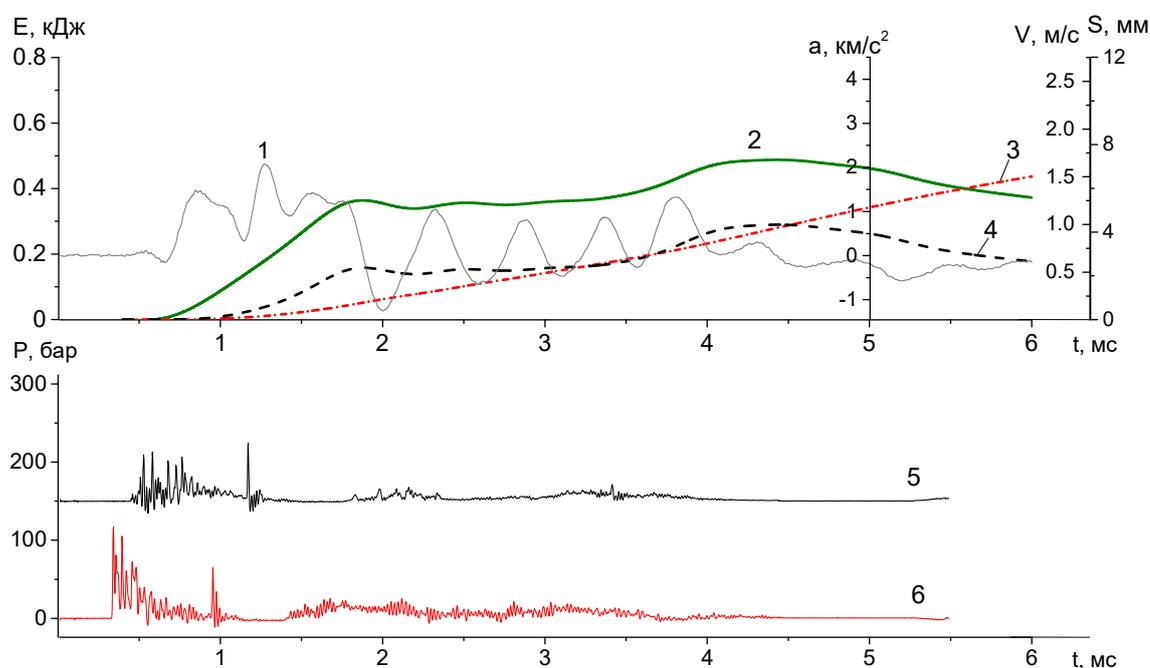


Рисунок 47. Результаты эксперимента с зарядом 30 г БЖВ на глубине 135 см в пузырьковой колонне (режим 2) [125]: 1 – ускорение; 2 – скорость; 3 – перемещение; 4 – кинетическая энергия; 5 – давление на датчике D_2 ; 6 – давление на датчике D_1

пузырьковой средой. Анализ движения импульсомера показывает увеличение как максимальной набранной им кинетической энергии, так и величины полного перемещения за время действия волн сжатия при наличии пузырьковой колонны. Это свидетельствует об эффекте передачи кинетической энергии, сообщенной расширяющимися ПД гетерогенной среде, в заданном пузырьковой колонной направлении. Набор скорости импульсомером происходит в две стадии, как и в случае взрыва в сплошной воде. При этом длительность процесса набора скорости увеличивается, что находится в согласии с фактом увеличения длительности волн сжатия. Набор скорости импульсомером на второй стадии разгона ниже, и составляет 35% от максимальной (против 44% в случае сплошной воды).

4.2 Взрыв металлизированного ВВ в воде

Переход от идеальных зарядов к исследованию поведения сверхбогатых неидеальных составов проведен по следующей схеме: сначала проведен взрыв заряда базовой смеси 1:1 в сплошной воде, который сравнивается со взрывом аммонита в тех же условиях. Затем базовый заряд 1:1 взорван в пузырьковой колонне в условиях, аналогичных опыту 2 из таблицы 14 (заряд аммонита с пузырьковой колонной 2-го режима).

4.2.1 Взрыв высокометаллизированного заряда в сплошной воде

При взрыве заряда 1:1 использована схема эксперимента с зарядом аммонита в сплошной воде (см. опыт 1). В результате амплитуда ГУВ увеличилась более, чем в 2.4 раза (355 бар против 148 бар), что связано с увеличением теплоты взрыва. Удельная энергия УВ также увеличивается в 1.4 раза, с 0.64 МДж/кг до 0.9 МДж/кг, что ожидаемо, т.к. при взрыве дореагирует избыточный алюминий. На записи сигнала верхнего датчика давления D_2 появляются острые импульсы с амплитудой до 80 бар в области за ведущей ГУВ. Эти импульсы возникают из-за взрывного дореагирования алюминия с водой при расширении ПД. В ходе пульсаций пузыря с ПД наблюдались вторичные вспышки. Подтверждением тому являются некоторые кадры скоростной видеосъемки поверхности воды

(1.34 МДж/кг), и достигает значения, полученного при взрывах тритонала и гексогена. Давление на фронте УВ ниже, чем при неидеальном взрыве в сплошной воде, но выше, чем при взрыве аммонита в воде с пузырьками. На профилях давления за ГУВ присутствуют множественные импульсы сжатия. Это означает, что происходит неравномерное дореагирование избыточного алюминия с водой в локальных областях неустойчивости, т.е. там, где произошло смешение.

Как было показано в работе [76], определяющее влияние на дореагирование избыточного алюминия за УВ в облаке расширяющихся продуктов имеет скорость подмешивания воды в продукты, содержащие разогретый, готовый к реакции алюминий. В случае гетерогенной среды вода + пузыри воздуха эта скорость перемешивания значительно усиливается за счет более глубокого проникновения струй продуктов с алюминием в среду с низкоплотными включениями (пузырями). Сформированные при детонации струи испытывают многократные воздействия отраженных волн и дробятся в гетерогенной среде, за счет чего поверхность реакции увеличивается. Как результат, виден рост интенсивности реакции за УВ и повышение импульса УВ по сравнению со

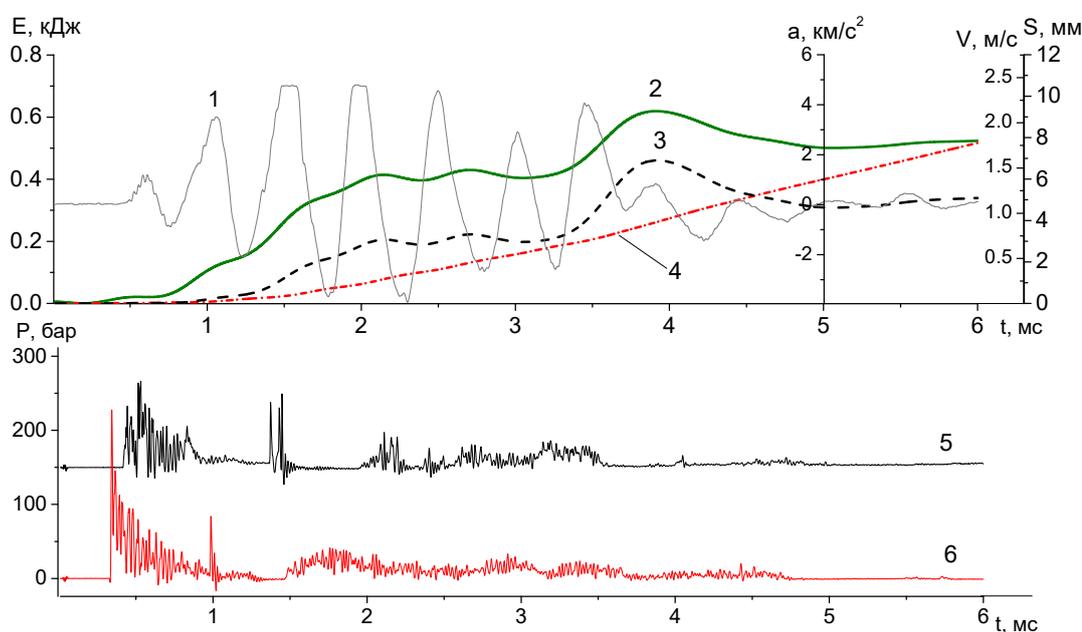


Рисунок 49. Результаты эксперимента с зарядом 26 г 1:1 +4 г БЖВ на глубине 135 см с пузырьковой колонной (режим 2) [125]: 1 – ускорение; 2 – скорость; 3 – перемещение; 4 – кинетическая энергия; 5 – давление на датчике D₂; 6 – давление на датчике D₁

взрывом состава 1:1 в сплошной воде, где подмешивание происходит в основном за счет неустойчивости контактной поверхности и струй, сформированных при истечении продуктов из оболочки. Повторные вспышки, наблюдаемые на кадрах скоростной съемки, означают, что реакция продолжается достаточно интенсивно и на стадии пульсаций. При этом они слабо различимы, так как свечение сильнее поглощается гетерогенной средой. Наличие пузырьковой колонны не только ускоряет реакцию, но и создает эффект направленности воздействия по сравнению со взрывом в сплошной воде. Это видно из записи давления верхнего датчика, амплитуда и длительность сигнала которого существенно выше, чем при неидеальном взрыве в сплошной воде. Такой вывод полностью подтверждается движением импульсомера. Например, профиль скорости показывает, что разгон происходит значительно более интенсивно, чем с неидеальным взрывом в сплошной воде и со взрывом аммонита в воде с пузырями. Обе стадии набора скорости присутствуют, однако набор скорости происходит равномернее, чем в опытах 2 и 4. Относительный набор скорости на второй стадии разгона превышает таковой в реперных опытах за счет большей энергии, выделяющейся при дореагировании струй избыточного алюминия с водой. Максимальные значения кинетической энергии и перемещения импульсомера также почти в 1.5 раза выше.

Проведенный эксперимент демонстрирует, что:

- наличие пузырей в воде вокруг заряда значительно увеличивает интенсивность дореагирования избыточного алюминия с водой;
- колонна из пузырьков способствует перераспределению энергии взрыва вдоль нее, что приводит к направленному действию волн сжатия;
- механическое действие неидеального взрыва, проведенного в данной постановке, усиливается;
- энергия УВ повышается до уровня мощного ВВ за счет увеличения длительности импульса.

Причина разницы между интегральными импульсами волн сжатия в воде, определенными по показаниям датчиков давления и по движению импульсомера,

заключается в том, что интегрирование профиля давления учитывает только статическую часть импульса, которая при взрыве в сплошной воде практически совпадает с полным импульсом. В присутствии сжимаемой среды динамическая часть импульса (за счет течения среды) увеличивается, причем тем больше, чем меньше плотность среды. При отражении волны сжатия от преграды динамическая часть импульса складывается со статической, и результирующий полный импульс растет.

В малых пузырях первая (ударная) фаза дает существенно больший импульс как статический, так и динамический из-за меньшей разгрузки внутрь колонны и быстрого уплотнения пузырьковой среды в колонне боковой волной, которая еще и разгоняет среду в сторону мишени. В тоже время проникновение продуктов в колонну затрудняется более высокой плотностью среды перед поверхностью раздела «среда – продукты». Естественно это уменьшает вклад реакции в дальнейшее движение среды из-за замедления смещения, что сказывается на полном импульсе волны сжатия позднее. Расширение пузыря несколько затягивается (давление за счет реакции растет также медленнее), хотя не исключено, что алюминий, в конце концов, реагирует достаточно полно, поскольку смешение происходит в более узкой зоне, где концентрация продуктов и температура выше, чем случае менее плотной колонны. Следует учесть, что эта реакция должна разогнать среду перед зоной, где она в основном протекает и сгорает основная часть алюминия. Такая среда менее сжимаема, чем в случае больших пузырей, т.е. каскадного возрастания скорости и накопления кинетической энергии не произойдет (столб будет разгоняться почти как единое целое). Импульс будет «теряться» на объемное, ненаправленное расширение. При самых больших пузырях и расходе воздуха в генераторе пузырьков разгрузка боковой ГУВ (по сплошной воде) существенно возрастает, так что давление на верхнем датчике может практически исчезнуть. На нижнем датчике давление возрастет за счет реакции, однако будет спадать быстрее. В дальнейшем давление на первой стадии будет поддерживаться расширяющимися и реагирующими продуктами. Расширение продуктов преимущественно пойдет вдоль колонны.

Реакция будет протекать в тем большем объеме, чем больше концентрация воздуха пузырей в воде. При этом естественно возрастут потери энергии на прогрев и испарение воды. В зоне, куда проникают алюминизированные ПД, воды всегда намного больше, чем требуется для полного дореагирования алюминия за счет увеличения поверхности контакта. На основании вышесказанного следует, что при какой-то оптимальной концентрации воздуха в гетерогенной среде параметры волн сжатия и энергия, переданная препятствию, будут максимальными.

4.3 Влияние длины пузырьковой колонны

Полученные в предыдущем эксперименте повышенные параметры направленного действия неидеального взрыва ставят вопрос: оптимально ли расположение препятствия относительно заряда в случае присутствия пузырьковой колонны с точки зрения получения максимального воздействия на него? Для ответа проведены сравнительные эксперименты, в которых заряд 1:1, взорванный в условиях пузырьковой колонны (режим 3) располагается на различной глубине: 1.35 м и 2.05 м от поверхности (опыты 6 и 7 соответственно). Режим 3 работы генератора пузырей (наибольший расход и соответственно самые крупные пузыри) выбран после неудачных попыток создать стабильную равноплотную и длинную колонну пузырьков в режимах 1 и 2. При низком расходе колонна в верхней части становится нестабильной, т.к. на траектории пузырьков значительно влияют вертикальные циркуляционные течения в емкости. Поэтому в верхней части пузырьковая колонна расширяется до всего поперечного сечения емкости. Наблюдения за поведением крупных пузырьков в длинной колонне показывает, что радиальное рассеяние пузырьковой колонны не превышает 10 %. Это означает, что средняя плотность гетерогенной среды «вода + пузыри» изменяется незначительно в сравнении с опытом 6 (см. таблицу 14).

Время реакции избыточного алюминия внутри более длинной пузырьковой колонны может быть выше, чем в опыте 6, в котором оно ограничено временем

разгрузки. Следовательно, максимальный механический эффект воздействия взрыва на препятствие также может быть выше за счет более длительного времени воздействия. Поэтому проведен опыт, в котором заряд на основе состава 1:1 размещается на большей глубине (см. опыт 7 в таблице 14). Генератор пузырьков находится на 0.5 м ниже зряда. Таким образом, длина пузырьковой колонны от заряда до торца импульсомера увеличивается в два раза. Отметим, что в опыте 7 датчик D_1 располагается несколько ближе к заряду ($R=0.37$ м).

Сравнение профилей давления датчика D_1 (напротив заряда) показывает, что они схожи за исключением более раннего прихода волны разгрузки в опыте 6 в соответствии с меньшей глубиной его размещения. В остальном записи похожи и позволяют сделать вывод о воспроизводимости процессов вблизи заряда. С другой стороны, верхний датчик D_2 , расположенный вблизи импульсомера, демонстрирует в опыте 7 совершенно иную картину, чем в опыте 6. ГУВ практически отсутствует – волна практически полностью поглощена пузырьковой средой. Однако длительность фазы волн сжатия от дореагирования вырастает более чем в два раза. В тоже время реакция алюминия с водой продолжается дольше, чем это возможно при меньшей длине пузырьковой колонны в опыте 6. Но, несмотря на большую полноту реакции, механическое действие на импульсомер заметно снижается по всем параметрам. Это связано с рассеянием энергии волны сжатия в стороны при более длинном гетерогенном участке, и большим поглощением энергии пузырьковой средой. Стадии набора скорости импульсомером едва различимы. Судя по кадрам видеосъемки, вертикальные перемещения емкости и воды в опыте 7 больше, чем в остальных экспериментах. Такое движение обусловлено большим максимальным радиусом образовавшегося газового пузыря вследствие более полного дореагирования избыточного алюминия, так как длительность реакций меньше ограничивается временем разгрузки. Импульсомер не показывает увеличения своей кинетической энергии, поскольку при подобной постановке эксперимента размеры импульсомера (главным образом площадь его торца) недостаточны для корректного измерения

воздействия волны сжатия, так как энергия распределяется по большему объему. Из этого следует несколько важных выводов:

- оптимальное взаиморасположение элементов установки соответствует опыту 6 и поэтому дальнейшие сравнительные эксперименты проводятся в подобной геометрии;
- увеличение запаса времени до момента разгрузки приводит к повышению полноты реакции алюминия. В таком случае усиливается механическое действие волны сжатия;
- при большом объемном содержании пузырей в воде (3 режим) происходит поглощение ГУВ.

4.4 Влияние плотности пузырьковой колонны на параметры взрыва

Для исследования влияния на параметры неидеального направленного подводного взрыва свойств пузырьковой колонны в дополнение к имеющимся и рассмотренным выше опытам 4, 5 и 6 проведен еще один в той же постановке, но с подачей воздуха в режиме 1, т.е. с наименьшей объемной концентрацией пузырьков в колонне (опыт 8). Кроме того, для выяснения влияния объемного содержания пузырьков в воде можно использовать эксперименты, в которых содержание избыточного алюминия в заряде увеличено. К ним относятся взрывы смесей 1.5:1 и 2:1 с режимами подачи воздуха 1 и 3. Таким образом, имеются данные по взрывам зарядов с различным избытком металлического горючего на основе смесей 1:1, 1.5:1 и 2:1 для сравнения между собой при различных режимах подачи газа.

Вначале рассматриваются результаты экспериментов со смесью 1:1 (опыты 4, 5, 6, 8). Сравнение профилей давления датчика D_2 , расположенного на уровне импульсомера, показывает интересную особенность: когда появляются пузыри, на сравнительно гладком, в случае сплошной воды, сигнале спада давления после ведущего фронта ГУВ начинают появляться пульсации сигнала, причем период таких пульсаций увеличивается с ростом размера пузырьков. Это связано с зависимостью размера областей с пониженной относительно средней плотностью

в колонне от режима подачи воздуха. В случае больших пузырей размер областей с пониженной плотностью также становится больше.

Сигналы нижнего датчика D_1 , который находится на границе пузыря с продуктами взрыва, также имеют подобную зависимость от размера пузырьков, но с одним отличием – при крупных пузырях, как, например, в опыте 6, УВ сильнее задемпфирована. Это не противоречит утверждению о том, что большие расходы в пузырьковой колонне приводят к большему поглощению УВ. Однако наименьшая энергия при взрыве в сплошной воде составила 0.9 МДж/кг (опыт 4), а при наличии пузырьковой колонны максимальная энергия в 1.34 МДж/кг наблюдается при пузырьках среднего размера (опыт 6). Это означает, что размер пузырей и средняя плотность пузырьковой колонны имеют некоторые оптимальные значения, при которых поглощение УВ не велико, а степень подмешивания воды в зону реакции избыточного алюминия оптимальна для наибольшей полноты реакции.

Для всех полученных профилей давления рассчитывается импульс, причем пределы интегрирования выбираются в каждом из профилей от фронта ГУВ до момента появления на профиле первой отраженной волны. Эта волна имеет вид узкого импульса давления, приходящего примерно через 0.8 мс после фронта ГУВ. Данные об импульсах представлены в таблице 14. Видно, что при наличии пузырьковой колонны (режим 2 в опыте 5) импульс I_2 на датчике D_2 вблизи импульсомера выше, чем в других опытах в среднем на 20 %. Это подтверждает сделанный ранее вывод о существовании оптимальных свойств пузырьковой колонны для каждой исследованной смеси. На нижнем датчике D_1 поглощение пузырьками импульса ГУВ, в опытах с пузырьковой колонной сказывается меньше. Высокое значение импульса наблюдается также в опыте 5 со средним объемным содержанием пузырей (режим 2 работы генератора пузырьков).

Сопоставление амплитуд и форм сигналов датчиков давления, соответствующих импульсам сжатия за ГУВ, также указывает на некоторые закономерности. 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 имел большой избыток алюминия (опыты 9 и 10 для смеси 1.5:1, а также 11 и 12 для смеси 2:1 соответственно), показывает заметное влияние объемного содержания пузырьков в гетерогенной колонне. Так, 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 максимальный. 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 (режим 3), в процессе торможения на торце препятствия волна сжатия имеет больший импульс. Это наблюдение также подтверждает наличие направленного эффекта действия взрыва.

Опыты со взрывами внутри пузырьковых колонн демонстрируют увеличение всех параметров движения импульсомера в сравнении с результатами, полученными в сплошной воде. Это говорит о направленном эффекте действия взрыва. Однако параметры движения импульсомера, соответствующие наибольшему механическому действию взрыва, в испытаниях со смесью 1:1 (опыты 5-8) показывает 8-ой с мелкими пузырями, в то время как оптимум по параметрам волн сжатия приходится на эксперимент со средним размером пузырьков в колонне (режим 2). Если рассмотреть зависимости набора скорости импульсомером, на которых первая стадия в опыте с мелкими пузырями наиболее интенсивна, то можно объяснить подобное усиление механического действия взрыва. При мелких пузырях и соответственно минимальном расходе воздуха, поглощение УВ также минимально, и, таким образом, ведущая волна сжатия, поддержанная реакцией алюминия с водой, вносит в разгон импульсомера

значительную долю. Кроме того, волна сжатия внутри пузырьковой колонны отстает от УВ, распространяющихся по сплошной воде вдоль колонны пузырьков, из-за меньшей скорости звука в гетерогенной среде. Поэтому боковые волны «поджимают» колонну с мелкими пузырями, провоцируя эффект, похожий на кумуляцию энергии волны сжатия в колонне. Это и является причиной усиления механического действия на импульсомер на первой стадии набора скорости. При низком объемном содержании газа в воде разгрузка по пузырьковому слою на боковых стенках импульсомера наступает позже, что также способствует более интенсивному его разгону. Предположение о влиянии пузырей поднимающихся вдоль стенок проверено. В случае с крупными пузырями, где параметры разгона импульсомера выше, чем при пузырях среднего размера, высокий вклад ведущей волны объясняется большей сжимаемостью среды с большим содержанием воздуха. Сделанный вывод подтверждается длительностью первой стадии разгона, которая выше чем в других случаях. Кроме того, зависимость перемещения от времени не имеет выраженного излома, отделяющего две стадии набора скорости как в двух других случаях. Это также указывает на большую длительность воздействия на торец импульсомера в ходе первой стадии набора скорости в случае разгона волны сжатия по колонне крупных пузырей с большей концентрацией воздуха в ней. 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. Полученный результат доказывает предложенное выше объяснение влияния свойств пузырьковой колонны.

4.5 Влияние количества алюминия в составе заряда на параметры волн сжатия в воде

Для исследования влияния избытка металлического горючего в составе неидеального заряда рассмотрены две группы экспериментов. Первая группа (опыты 8, 9 и 11) – неидеальные заряды, взорванные внутри гетерогенной колонны «вода + пузыри» с наименьшей объемной долей воздуха (1 режим работы генератора пузырьковой колонны). Вторая группа (опыты 6, 10 и 12) – те

же заряды, но взорванные внутри пузырьковой колонны с максимальным расходом воздуха (режим 3). В каждой группе исследуются по три различных взрывчатых состава с различным содержанием алюминия (1:1, 1.5:1 и 2:1).

Полученные результаты измерений показывают, что параметры взрывных волн не демонстрируют монотонных зависимостей по мере обогащения смесей (см. таблицу 14). Так, импульс волны сжатия на нижнем датчике D_1 максимален в случае заряда с составом 1.5:1, а наибольшее давление составляет 193 бар в опыте с составом 1:1. На датчике D_2 , 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. Характер набора скорости воспроизводимо двухстадийный, что характерно для пузырьковой колонны с мелкими пузырьками и небольшой долей воздуха в воде. 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 (подскок емкости, расплескивание, деформация и растяжение конструкций) заметно сильнее. Так, емкость выдвигается из грунта на большую величину, а количество выплеснутой воды снижает уровень в емкости на 0.5 метра, что на порядок больше чем для составов 1:1 (5 см).

Проведенная серия опытов показывает, что особой выгоды на начальном этапе воздействия взрыва увеличение содержания алюминия в составе смеси не несет, и наиболее оптимальной по подавляющему большинству параметров оказывается смесь 1:1. Однако в случае взрыва зарядов большей массы и при наблюдении в течение более длительного времени можно ожидать усиление эффекта.

Во второй группе экспериментов с наибольшим содержанием воздуха в пузырьковой колонне (см. таблицу 14) максимальное давление на нижнем датчике уменьшается по мере обогащения смеси. Такое снижение объясняется большим количеством инерта и теплопотерями при детонации заряда. Давление на верхнем датчике и импульс на нижнем имеют максимум при взрыве заряда с составом 1.5:1. Однако величина импульса на верхнем датчике в этом опыте минимальна. Такое поведение вызвано оптимальными условиями дореагирования вблизи заряда, окруженного средой с хорошо развитыми неоднородностями, что способствует интенсивному подмешиванию воды в зону реакции и плохим дореагированием алюминия при последующем движении колонны. Характер движения импульсомера соответствует всем опытам с большим содержанием пузырей в колонне. Набор скорости происходит монотонно, со слабо выраженной первой стадией. Параметры движения снижаются с увеличением содержания алюминия в смеси. Однако поздние механические эффекты движения масс воды и емкости увеличиваются при обогащении смеси в заряде. Таким образом, обогащение смеси металлом не дает преимуществ на начальной стадии воздействия.

4.6 Влияние положения генератора пузырьковой колонны относительно заряда

Во всех предыдущих экспериментах генератор пузырьков воздуха располагается на полметра ниже заряда. Подобное расположение выбрано по следующим причинам:

- гетерогенная среда вокруг заряда будет способствовать смешению с ПД, содержащими готовый к вступлению в реакцию алюминий, что увеличивает интенсивность реакции;

- непрерывное взаимодействие «облако ПД + зона реакции избыточного металла + колонна пузырьков» будет обеспечивать наименьшие потери при разгоне гетерогенной среды для последующего воздействия на препятствие.

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. В первом случае (опыт 13) предполагается, что наличие несжимаемой воды под зарядом увеличит ускорение гетерогенного столба. Во втором случае (опыт 14) ожидается, что наличие прослойки сплошной воды между зарядом и гетерогенной колонной позволит до момента впрыска избыточного алюминия в канал с гетерогенной средой повысить начальные параметры продуктов (давление и температуру), что усиливает реакцию в пузырьковой колонне. Результаты этих экспериментов также представлены в таблице 14. За исключением положения генератора пузырьковой колонны относительно заряда, остальные условия экспериментов соответствовали опыту 8, в котором заряд 1:1 взрывается внутри пузырьковой колонны с мелкими пузырьками. Опыт 8 выбран в качестве реперного, так как именно в нем достигаются максимальные параметры движения импульсомера, в частности, максимальная кинетическая энергия.

При взрыве заряда под пузырьковой колонной в опыте 14, с прослойкой сплошной воды между зарядом и барботированной водой, обращает на себя внимание более глубокое разделение стадий набора скорости импульсомером (см. рисунок 50). Первая стадия более энергичная, чем в других опытах с мелкими пузырями. Это подтверждает, что начальный разгон гетерогенной среды протекает интенсивнее за счет более высоких давления и температуры ПД, в начальный момент «запертых» в сплошной воде. Давление на фронте ГУВ на датчике D_1 также наиболее высокое в серии. В целом максимальные параметры движения импульсомера несколько выше, чем в реперном опыте.

В опыте 13 гетерогенная колонна начинается на уровне заряда. Отсутствие разгрузки при иницировании заряда снизу и непрерывная связь ПД с гетерогенной средой, являющейся поставщиком воды в зону реакции, обеспечивают максимальные параметры движения импульсомера не только в

сравнении с реперным опытом 8, но и всеми остальными проведенными экспериментами. Исследование записей давления показало (см. рисунок 51),

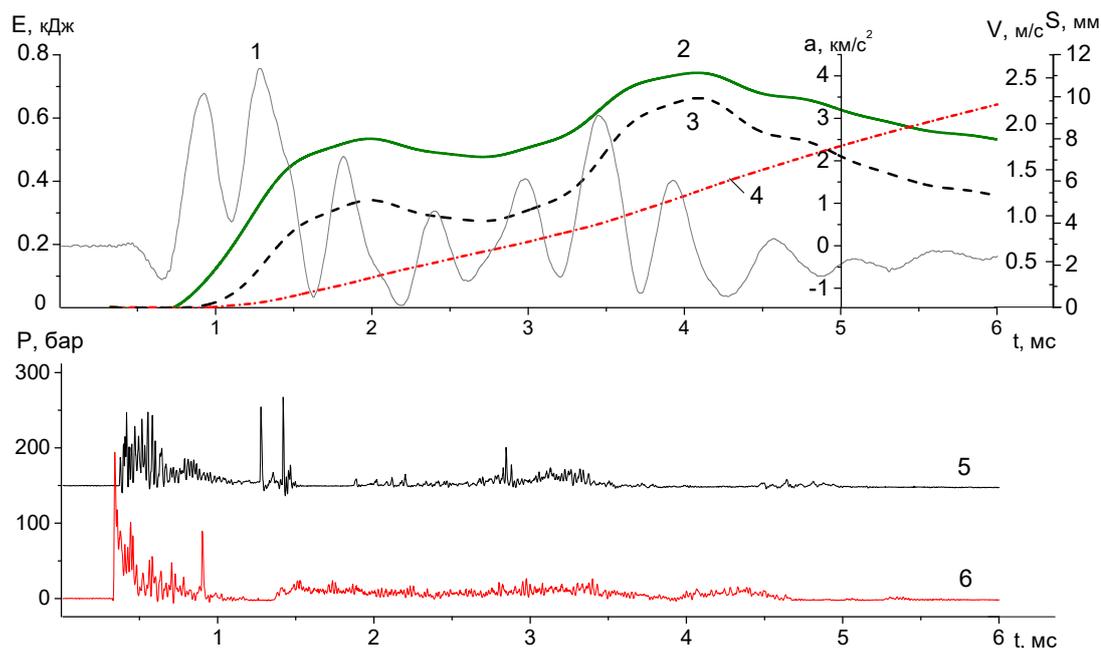


Рисунок 50. Результаты эксперимента с зарядом 26 г 1:1 + 4 г БЖВ на глубине 135 см в воде, с пузырьковой колонной, начинающейся на 20 см выше заряда (режим 1) [125]: 1 – ускорение; 2 – скорость; 3 – перемещение; 4 – кинетическая энергия; 5 – давление на датчике D_2 ; 6 – давление на датчике D_1

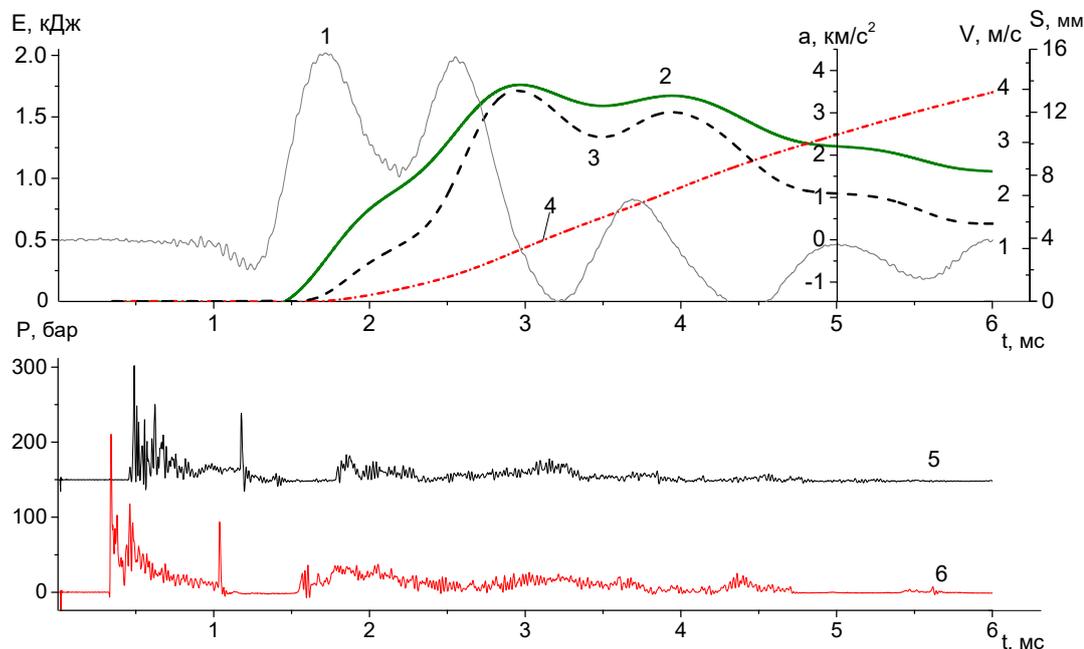


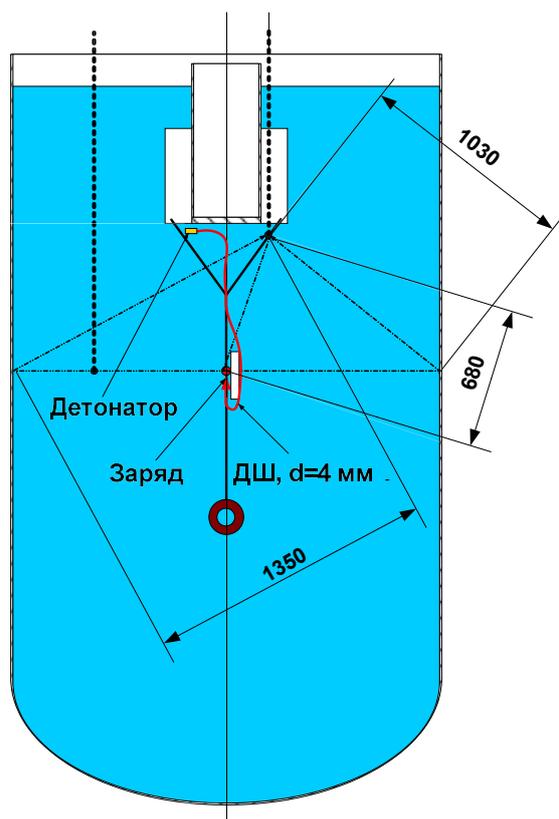
Рисунок 51. Результаты эксперимента с зарядом 26 г 1:1 + 4 г БЖВ на глубине 135 см в воде, с пузырьковой колонной, начинающейся на уровне заряда (режим 1): 1 – ускорение; 2 – скорость; 3 – перемещение; 4 – кинетическая энергия; 5 – давление на датчике D_2 ; 6 – давление на датчике D_1

что стадийность при наборе скорости практически отсутствует, т.е. обе стадии набора практически сливаются. Это означает, что первичная волна сжатия поддерживается реакцией в гетерогенной колонне, а полнота реакции максимальна в пределах временного интервала, в котором сделаны инструментальные измерения. Последующие эффекты (подъем емкости, выброс воды) являются значительно более слабыми, чем в опытах со смесью 2:1. Опыт 13 наглядно демонстрирует, что оптимальным относительно гетерогенной колонны расположением заряда является его размещение у сплошной воды, т.е. вблизи генератора пузырьков.

4.7 Другие способы усиления действия взрыва на препятствие

Как показано выше, создание пузырьковой колонны, т.е. канала с пониженной плотностью и сжимаемостью среды, от богатого металлом неидеального заряда к предполагаемой цели воздействия, является эффективным способом получения направленного эффекта высвобождения энергии взрыва. Создание пузырьковой среды на практике является технически сложной задачей. Поэтому проверен и более простой способ получения желаемого эффекта. Проведен эксперимент, в котором туннель с пониженной плотностью от заряда к препятствию создается путем взрыва детонационного шнура (ДШ), проложенного от заряда к цели. Причем вначале инициируется ДШ, который с некоторой задержкой инициирует заряд (опыт 17, см. таблицу 14). Схема проведения показана на рисунке 52.

Для создания туннеля используется водостойкий ДШ марки ДШЭ-4 диаметром 4 мм. Измеренная скорость детонации шнура составляет 6.7 км/с. Шнур заводится в заряд снизу, а инициируется от торца импульсомера. Результаты эксперимента представлены на рисунке 53. Проведено сравнение с опытом 8, где от заряда до импульсомера идет колонна пузырьков мелкого размера. На записях давления (см. рисунок 53) присутствуют двойные импульсы, связанные с последовательным инициированием ДШ и основного заряда. Сигнал на верхнем датчике появляется первым т.к. инициирование ДШ происходит



а

б

Рисунок 52. Создание пузырьковой колонны с помощью ДШ: а - схема эксперимента 17; б – способ подведения детонационного шнура к заряду

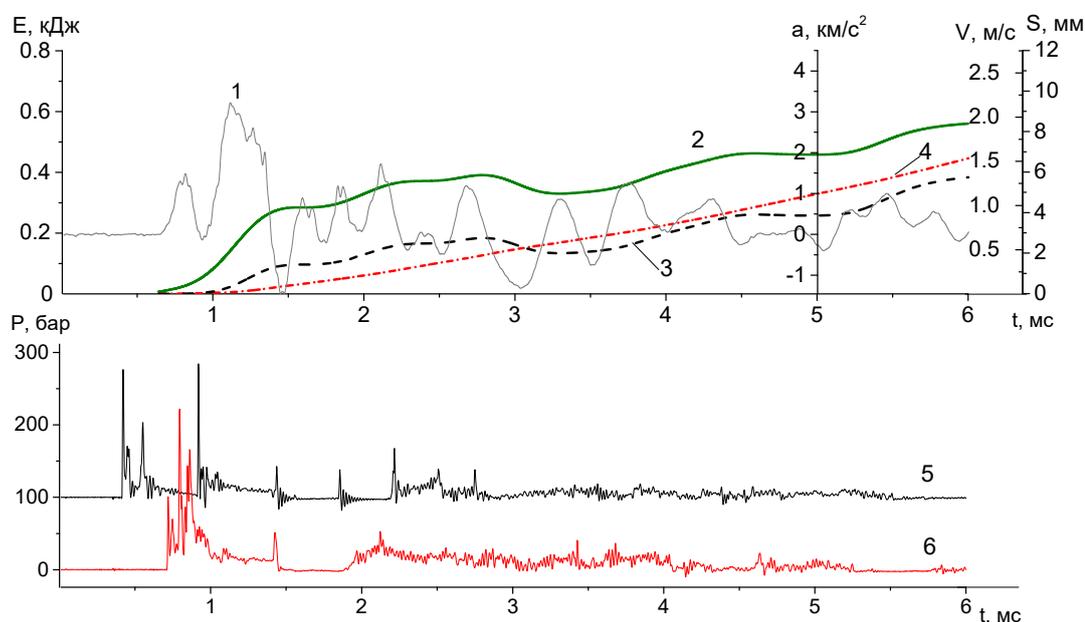


Рисунок 53. Результаты эксперимента с зарядом 26 г 1:1 +4 г БЖВ на глубине 135 см в канале пониженной плотности от заряда к импульсомеру, полученным в результате подрыва ДШ: 1 – ускорение; 2 – скорость; 3 – перемещение; 4 – кинетическая энергия; 5 – давление на датчике D_1 ; 6 – давление на датчике D_2

вблизи него. Параметры движения импульсомера не превышают реперного опыта 8. Однако максимальные значения кинетической энергии и набранной скорости выше некоторых опытов, в которых использовалась колонна из пузырьков. Если сравнить этот опыт со взрывом состава 1:1 в сплошной воде (опыт 4), то видно, что параметры движения импульсомера в случае использования ДШ выше. Это означает, что подобный способ также обеспечивает направленное действие взрыва и при соответствующей оптимизации может быть использован для организации направленного энерговыделения. Возможна замена взрывчатого состава в шнуре на более медленный, использование нескольких шнуров или спирально скрученного ДШ.

4.8 Параметры волн сжатия при действии направленного неидеального подводного взрыва на неподвижное препятствие

С целью увеличения временного окна регистрации параметров волны сжатия, а также для подтверждения сделанного выше вывода о росте интенсивности реакции алюминия с водой при взрыве в пузырьковой среде, проведены эксперименты, в которых пузырьковая колонна направлена от дна емкости с неподвижным препятствием к заряду, как это показано на рисунке 28. Над зарядом колонна пузырьков прерывается отражателем для исключения разгрузки в сторону поверхности водоема. На записи, полученной на датчике в пузырьковой колонне на расстоянии 1.7 м от заряда (см. верхний график на рисунке 54), наблюдается более плавный, высокий и длительный импульс. На записи, полученной в сплошной воде на расстоянии 0.5 м от заряда (см. нижний график на рисунке 54), отчетливо видны множественные резкие импульсы давления. Они связаны с многократным отражением ГУВ при прохождении через пузырьковую колонну в поперечном направлении. Такое же поведение наблюдается во всех экспериментах, где алюминизированные заряды взрывались внутри пузырьковой жидкости. Подобный эффект наблюдается даже при достаточно низкой скорости потока пузырьков (5 л/мин).

Кроме того, для уточнения влияния плотности пузырьковой колонны на параметры подводного взрыва при воздействии на неподвижное препятствие проведены опыты с зарядами типа 1:1, взорванными в пузырьковых колоннах с различным расходом воздуха (см. рисунок 55).

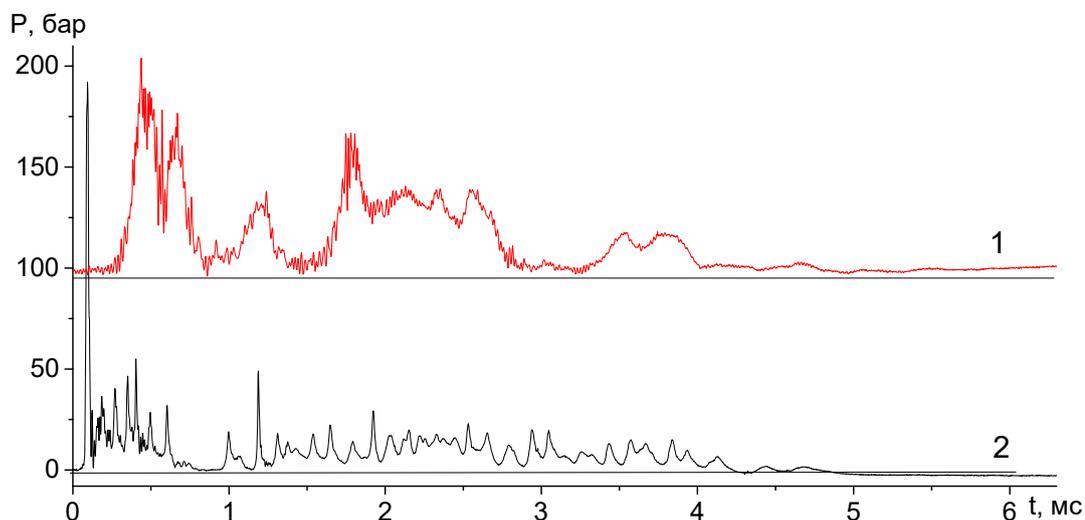


Рисунок 54. Сравнение записей давления для эксперимента с зарядом 26 г состава 1:1 +4 г БЖД, в пузырьковой колонне (расход 20 л/мин) [133]: 1 – датчик в колонне; 2 – датчик в сплошной воде

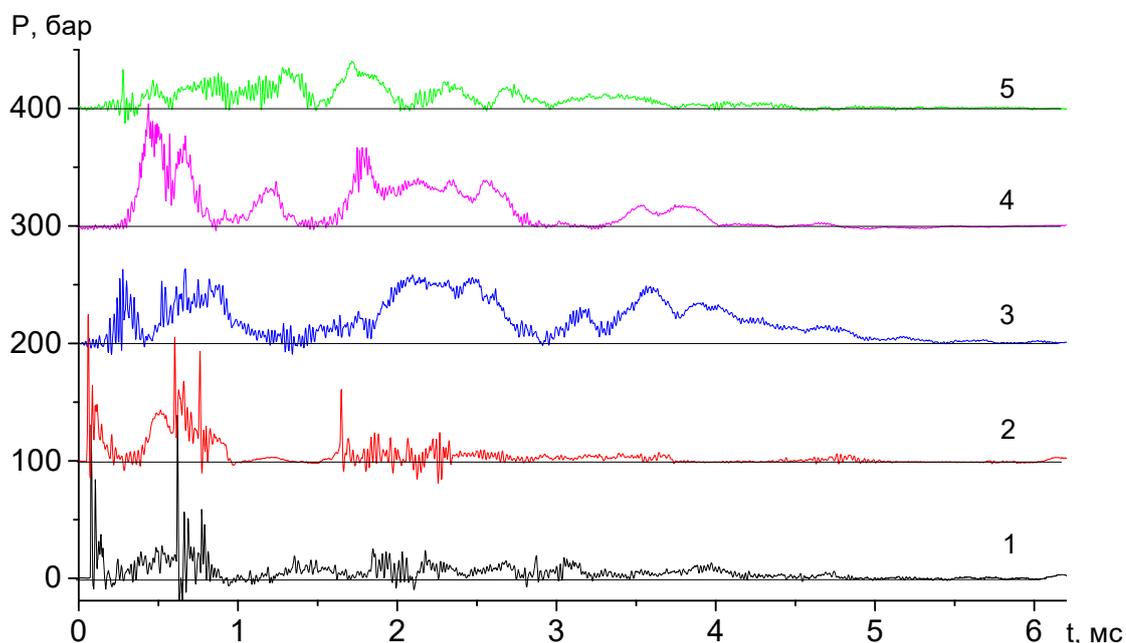
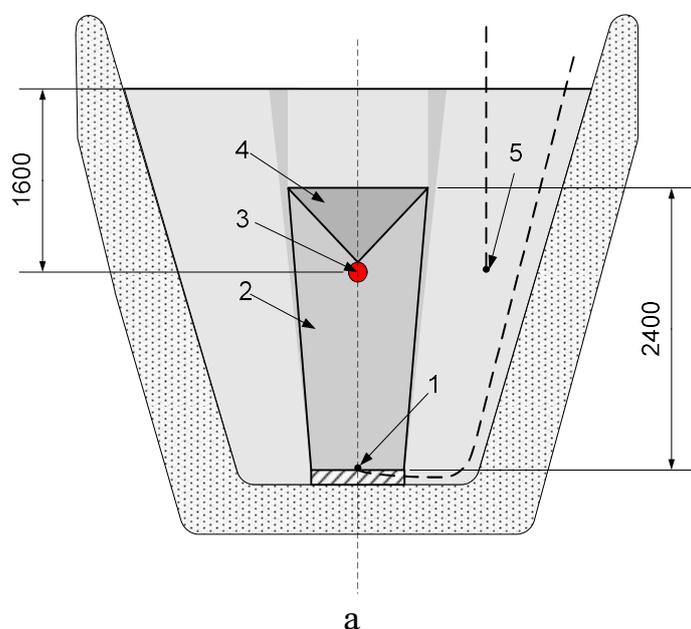


Рисунок 55. Результаты экспериментов с различными зарядами [133]: 1 – аммонит в сплошной воде, $I=0.031$ бар·с; 2 – 1:1 в сплошной воде, $I=0.028$ бар·с; 3 – 1:1 в пузырьковой колонне (10 л/мин), $I=0.112$ бар·с; 4 – 1:1 в пузырьковой колонне (20 л/мин), $I=0.075$ бар·с; 5 – 1:1 в пузырьковой колонне (40 л/мин), $I=0.045$ бар·с

Для опытов используются меньшие расходы воздуха, чем в предыдущих экспериментах (см. таблицу 14), так как установлено (см. выше), что при среднем расходе и объемной концентрации пузырей до 1% направленный эффект действия взрыва выше. Сравниваются взрыв аммонита и состава 1:1 в сплошной воде без пузырьковой колонны, а также состав 1:1, взорванный в пузырьковой колонне с различной концентрацией воздуха. Видно, что наибольший импульс волны сжатия 0.112 бар·с получен при расходе 10 л/м, что соответствует концентрации воздуха в колонне 0.4%. Для аммонита это значение составляет 0.031 бар·с.

4.9 Проверка масштабирования эффекта направленного действия взрыва

Для исследования масштабного эффекта проведены эксперименты, в которых применяются заряды с массой, увеличенной на порядок. Используется специально выкопанный водоем с увеличенными размерами, имеющий в основании окружность диаметра 4 м, зеркало воды диаметром 8 м и глубину 3.5 м (см. рисунок 56). Для сравнения исследованы металлизированные составы 1:1 массой



б



в

Рисунок 56. Исследование масштабирования эффекта направленного взрыва с зарядом увеличенной массы: а – схема эксперимента; б и в – фотографии бассейна. Цифрами на схеме обозначены: 1 – датчик D_1 ; 2 – пузырьковая колонна; 3 – заряд; 4 – отражатель пузырьков; 5 – датчик D_2

240 г и заряды тротила той же массы.

Заряды взрываются на середине глубины бассейна, а пузырьковая колонна простирается от дна до заряда, выше которого она ограничена пирамидальным отражателем. Таким образом, направленное действие заряда распространяется вниз, в направлении дна. Датчиком, установленным в стальной плите на дне, контролируется давление, а датчиком, расположенным на полувисоте бассейна – давление в стороне от заряда.

На основе опыта, полученного в экспериментах с зарядами меньшей массы, выбраны оптимальные свойства пузырьковой колонны и состав смеси. На рисунках 57 и 58 представлены результаты экспериментов по взрыву высокометаллизированных составов увеличенной массы. В итоге получен значительный эффект направленного действия во время взрыва высокометаллизированного заряда по сравнению со взрывом тротила в воде без пузырей при прочих равных условиях. Уровень давления в направлении

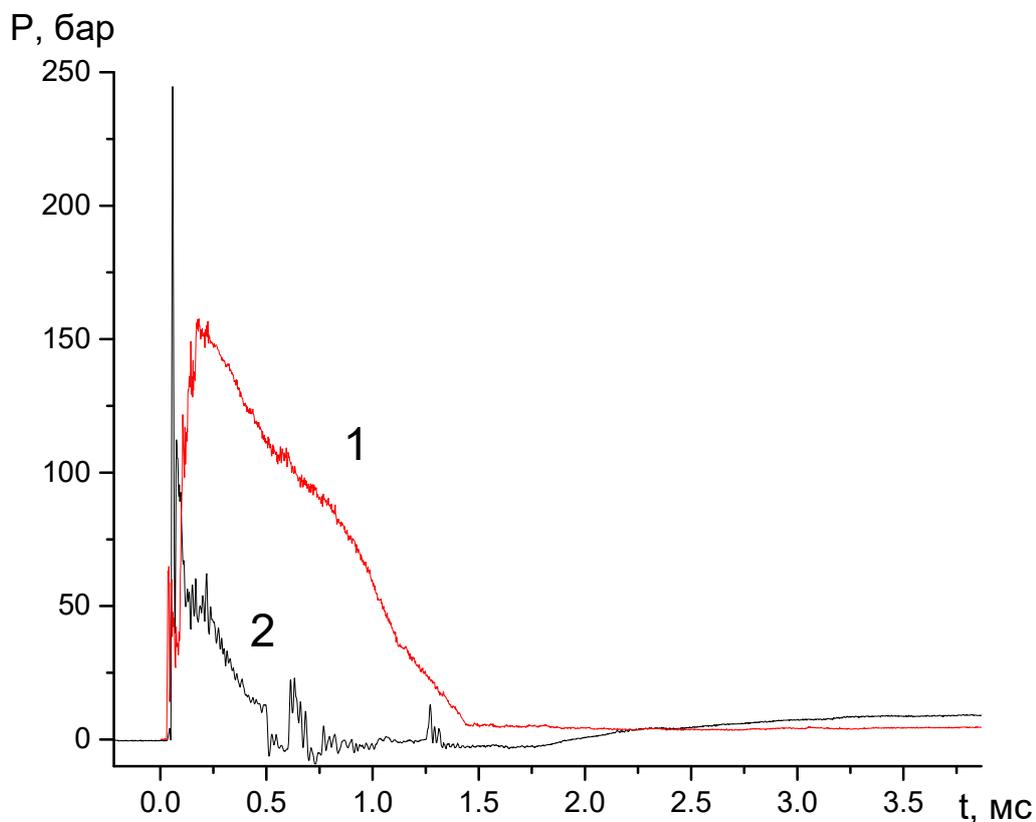


Рисунок 57. Записи давления, полученные в эксперименте с зарядом массой 240 г из состава 1:1: 1 – датчик D_1 закреплен на дне в зоне действия направленного импульса; 2 – датчик D_2 расположен в стороне от заряда в сплошной воде

пузырьковой колонны превышает давление на боковом датчике более, чем в два раза, что свидетельствует о направленном воздействии взрыва. Импульс взрывной волны, полученный в пузырьковой колонне, имеет большую длительность, чем полученный в сравнительном эксперименте в воде без пузырей. В целом проведенный эксперимент показал, что заряд масштабируется, а эффект направленного действия подводного взрыва достижим и при зарядах большей массы.

4.10 Оценка результатов исследования

Полученные результаты можно условно разделить на две группы: особенности неидеального подводного взрыва в сплошной воде и особенности в воде, содержащей гетерогенную колонну типа «вода +пузырьки воздуха». Сразу же следует сделать замечание, что полученные результаты о механическом действии волн сжатия на препятствие относятся только к начальной стадии взрыва, ограниченной временным окном в 10 мс, в котором проводилась регистрация сигналов. Однако, как показали исследования, действие неидеальных

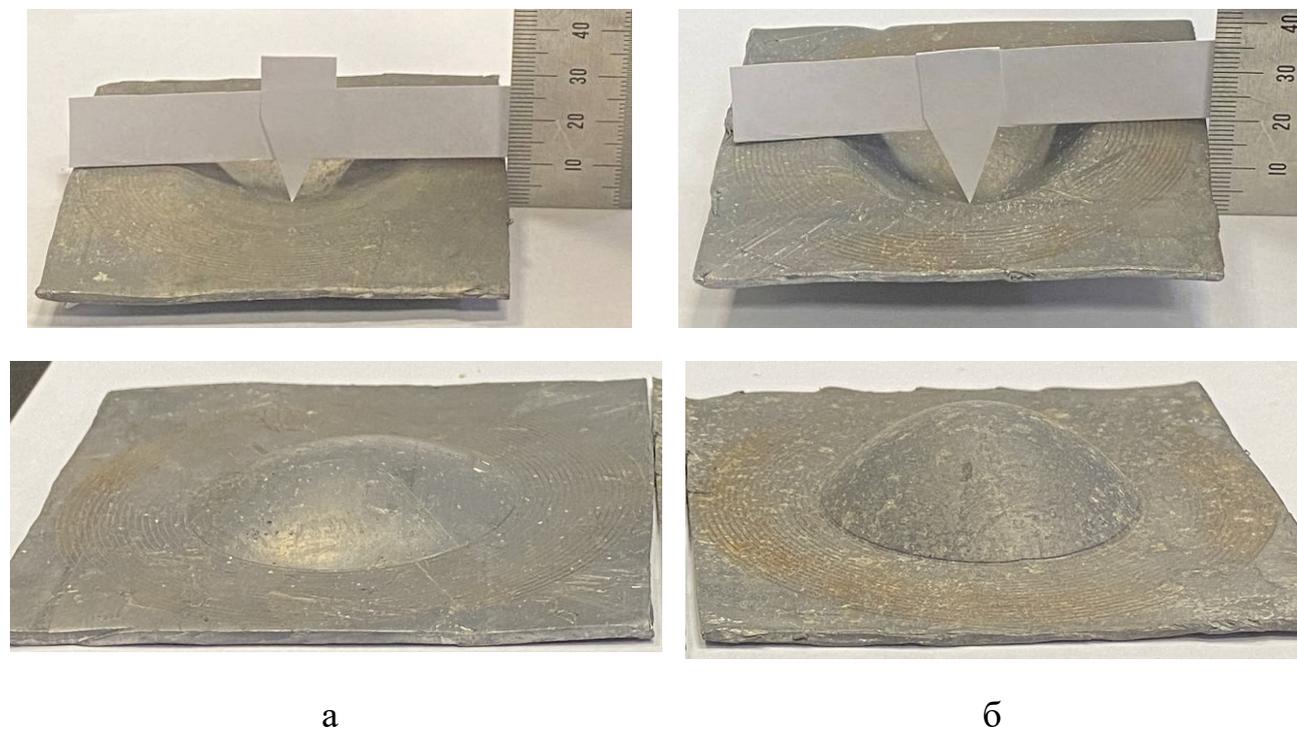


Рисунок 58. Мембраны крешерных датчиков, размещенных на дне бассейна: а – при взрыве тротила; б – при взрыве заряда со смесью 1:1

взрывов, судя по видеозаписям экспериментов, продолжается гораздо дольше используемого для измерений временного окна. При снижении интенсивности реакции из-за расширения или избыточного количества воды, попавшей в зону реакции, некоторая часть реакционноспособного алюминия может дореагировать позднее при пульсациях газового пузыря. Движение емкости и воды в ней продолжаются с существенной амплитудой до нескольких сотен миллисекунд. При этом в некоторых экспериментах наблюдались повторные вспышки, свидетельствующие о продолжающихся реакциях частиц алюминия с водой.

Получены данные, проясняющие механизм и стадийность неидеальных подводных взрывов высокометаллизированных составов, а также направленный эффект действия взрыва при наличии гетерогенного туннеля от заряда к препятствию.

При проведении измерений обнаружено, что движение подвижного импульсомера можно разделить на две стадии, которые относятся к действию первичной ГУВ и процессам, связанным с движением гетерогенной среды, а также с реакциями металлизированных ПД с водой.

Сравнение результатов экспериментов, полученных при взрывах идеальных ВВ и высокометаллизированных составов в сплошной воде, демонстрирует влияние дореагивания избыточного алюминия уже на первой стадии расширения ПД, сразу за ведущей ГУВ. Такие реакции увеличивают как амплитуду ГУВ в 1.5-2.0 раза, так и удельную энергию волны в 1.5 раза. Скорость, набранная импульсомером на первом этапе, также оказывается выше. Существенные отличия наблюдались на второй стадии движения импульсомера. При неидеальном взрыве эта стадия более растянута во времени. Из чего следует, что реакции алюминия с водой продолжаются и добавляют газовой фазы в расширяющуюся гетерогенную среду. Движущаяся со скоростью до 100 м/с сжимаемая среда, в которой продолжаются реакции, оказывает усиленное действие на импульсомер в сравнении с первой стадией воздействия ГУВ.

Сравнительные опыты по взрывам ВВ в сплошной и барботированной воде показали, что амплитуда ГУВ при движении вдоль пузырьковой среды

существенно снижается за счет демпфирования. Направленный эффект действия взрыва вдоль пузырьковой колонны имеется, но незначительный.

При взрыве алюминизированного заряда в окружении колонны пузырьков эффект существенно выше, чем в остальных рассмотренных случаях. Причем повышение параметров волн сжатия наблюдалось как на стадии распространения УВ, так и на стадии дореагирования. Взрыв заряда в гетерогенной среде приводит к увеличению подмешивания воды в зону реакции избыточного алюминия. Затянутая реакция за ГУВ повышает ее импульс и энергию. Сформированное реагирующее гетерогенное облако расширяется вдоль пузырьковой колонны, продолжая реагировать. Соотношения между давлениями на верхнем и нижнем датчиках и соответствующими импульсами свидетельствуют о повышении доли выделившейся энергии вдоль пузырьковой колонны, что доказывает направленность взрыва. Сравнение величин кинетической энергии, набранной импульсомером, и анализ стадий его движения подтверждают этот вывод. При этом для перераспределения энергии взрыва и достижения усиленного механического воздействия на препятствие необходимо учитывать сразу несколько факторов:

- увеличение сжимаемости пузырьковой колонны за счет большего расхода, с одной стороны, приводит к более равномерному нагружению преграды, а с другой, может привести к поглощению волны сжатия и снижению полноты реакции из-за неоптимального смещения;

- для данной постановки эксперимента (где площадь поверхности для измерения механического действия взрыва ниже, чем размер реагирующего пузыря) разгрузка волны сжатия вдоль стенок импульсомера при большом удельном содержании воздуха в воде является одной из причин потерь при его ускорении. Этот эффект снижает полученные характеристики механического действия взрыва;

- «поджатие» пузырьковой колонны обгоняющими боковыми волнами, распространяющимися по сплошной воде, в случае малой объемной концентрации мелких пузырей, может приводить к усилению механического

действия на преграду за счет снижения потерь давления внутри колонны на разгрузку в стороны. Возникает эффект, похожий на своеобразную «кумуляцию».

Проведенные эксперименты, в которых сравнивались неидеальные взрывчатые составы с различным отношением Al/O, показали, что для зарядов небольшой массы увеличение содержания алюминия не несет никакой выгоды. Оптимальной по параметрам волн сжатия является смесь 1:1. Однако наблюдаемые поздние механические эффекты показывают, что при наличии большего объема воды (глубины установки заряда) можно ожидать дополнительного действия взрыва. Кроме того, низкие показатели движения импульсомера при взрыве составов 1.5:1 и 2:1 явились результатом возможной неполной детонации заряда. Действительно, как было показано ранее в [76], смеси 1.5:1 и 2:1 в калибре 20 мм детонируют плохо. Поэтому в проведенных экспериментах предполагается следующий сценарий развития взрыва. Плохо детонирующий состав при расширении ПД содержит куски не прореагировавшей смеси. Эти куски, обладая высокой плотностью, далеко проникают в гетерогенную колонну, затем диспергируются и сгорают с существенной задержкой, не влияя на движение импульсомера, по крайней мере, первые 10 мс и вызывая поздние эффекты (вспышки), наблюдаемые на видеосъемке.

Положение гетерогенной колонны относительно заряда рассмотрено в сравнительных опытах, в которых колонна начиналась под зарядом, над ним и на его уровне. Выяснилось, что оптимальным является случай, в котором пузырьковая колонна начинается непосредственно у заряда. В этом случае действуют следующие факторы:

- отсутствует разгрузка в направлении, противоположном направлению начальных векторов массовой скорости ПД;
- более высокие давления на начальной стадии расширения усиливают смешение с водой и, следовательно, реакцию избыточного металла;
- имеется взаимосвязь всех стадий взрыва. В случае, когда между колонной пузырьков и зарядом есть слой сплошной воды, хотя и есть некоторая выгода от повышения давления и температуры ПД, «запертых» в сплошной воде,

дальнейшее развитие процесса при прорыве продуктов сквозь «перегородку» из сплошной воды происходит не оптимальным образом. Металл просто не успевает полностью прореагировать при движении, а боковая разгрузка нивелирует все преимущества, полученные вначале. Ожидается, что при более масштабных экспериментах тонкая прослойка сплошной воды между зарядом и пузырьковым туннелем увеличит параметры разгона реагирующей гетерогенной среды и усилит механическое действие на стадии столкновения с преградой.

Проведенные эксперименты с зарядами увеличенной массы показали, что заряд масштабируется, и эффект направленного действия подводного взрыва сохраняется.

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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коул Р. Подводные взрывы. — Москва: Иностранная литература. — 1950. — 494 с.
2. Bjarnholt G.G. Suggestions on standards for measurement and data evaluation in the underwater explosion test // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. — 1980. — V. 5, № 2–3. — P. 7–74.
3. Bjarnholt G.G., Holmberg R. Explosive expansion work in underwater detonations // *Proceedings of 6th symposium on detonation* / Ed. D.J. Edwards. — Arlington: Office of Naval Research. — 1976. — P. 540–550. — 806 p.
4. Hagfors M., Saavalainen J. Underwater explosions. Particle size effect of Al powder to the energy content of emulsion explosives // *Proceedings of the 36th annual conference on explosives and blasting technique*. — Orlando: International Society of Explosives Engineers. — 2010. — P. 1–16.
5. Athawale B.K., Asthana S.N., Singh H. Metallised fuel-rich propellants for solid rocket ramjet // *Defence Science Journal*. — 1994. — V. 44, № 4. — P. 269–278.
6. Huang H.T., Zou M.S., Guo X.Y., Yang R.J., Li Y.K. Study of reactions of activated Mg-based powders in heated steam // *Journal of Power Sources*. — 2014. — V. 246. — P. 960–964.
7. Huang L.Y., Xia Z.X., Zhang W.H., Huang X., Hu J.X. Combustion of a single magnesium particle in water vapor // *Chinese Physics B*. — 2015. — V. 24, № 9. — 094702: 1–10.
8. Ghassemi H., Farshi F.H. Investigation of interior ballistics and performance analysis of hydro-reactive motors // *Aerospace Science and Technology*. — 2015. — V. 41. — P. 99–105.
9. Schiemann M., Bergthorson J., Fischer P., Scherer V., Dan T., Schmid G. A review on lithium combustion // *Applied Energy*. — 2016. — V. 162. — P. 948–965.
10. Zhu X., Schoenitz M., Dreizin E.L. Mechanically alloyed Al–Li powders // *Journal of Alloys and Compounds*. — 2007. — V. 432. — P. 111–115.

11. Beloni E., Hoffmann V.K., Dreizin E.L. Combustion of decane-based slurries with metallic fuel additives // *Journal of Propulsion and Power*. — 2008. — V. 24, № 6. — P. 1403–1411.

12. Schoenitz M., Ward T.S., Dreizin E.L. Fully dense nano-composite energetic powders prepared by arrested reactive milling // *Proceedings of the Combustion Institute*. — 2005. — V. 30, № 2. — P. 2071–2078.

13. Shoshin Y.L., Mudryy R.S., Dreizin E.L. Preparation and characterization of energetic Al-Mg mechanical alloy powders // *Combustion and Flame*. — 2002. — V. 128, № 3. — P. 259–269.

14. Stamatis D., Jiang Z., Hoffmann V.K., Schoenitz M., Dreizin E.L. Fully dense, aluminum rich Al-CuO nanocomposite powders for energetic formulations // *Combustion Science and Technology*. — 2009. — V.181, № 1. — P. 97–116.

15. Shoshin Y.L., Dreizin E.L. Particle combustion rates for mechanically alloyed Al-Ti and aluminum powders burning in air // *Combustion and Flame*. — 2006 — V. 145, № 4. — P. 714–722.

16. Хуан Х.Т., Цзоу М.Ш, Го С.Я., Ян Ж.Ц., Ли Ю.К. Эффективность реагирования алюминия в составе топлива для прямоточных гидрореактивных двигателей // *Физика горения и взрыва*. — 2013. — Т. 49, № 5. — С. 39–48.

17. Campos E.A., Dutra R.C.L., Rezende L.C., Diniz M.F., Nawa W.M.D., Iha K. Performance evaluation of commercial copper chromites as burning rate catalyst for solid propellants // *Journal of Aerospace Technology and Management*. — 2010. — V. 2, № 3. — P. 323–330,

18. Zou M.S., Yang R.J., Huang H.T., He J.Y., Zhang P. The preparation of Mg-based hydro-reactive materials and their reactive properties in seawater. *International Journal of Hydrogen Energy*. — 2011. — V. 36, № 11. — P. 6478–6483.

19. Aly Y., Schoenitz M, Dreizin E.L. Ignition and combustion of mechanically alloyed Al-Mg powders with customized particle sizes // *Combustion and Flame*. — 2013. — V. 160, № 4. — P. 835–842.

20. Thiruvengadathan R., Bezmelnitsyn A., Apperson S., Staley C., Redner P., Balas W., Nicolich S., Kapoor D., Gangopadhyay K., Gangopadhyay S. Combustion

characteristics of novel hybrid nanoenergetic formulations // *Combustion and Flame*. — 2011. — V. 158, № 5. — P. 964–978.

21. Sundaram D.S., Puri P., Yang V. A general theory of ignition and combustion of nano- and micron-sized aluminum particles // *Combustion and Flame*. — 2016. — V. 169, № 2. — P. 94–109.

22. Beckstead M.W. A summary of Aluminium combustion. — Neuilly-sur-Seine: NATO Research & Technology Organization. — 2004. — 46 p.

23. Yetter R.A., Risha G.A., Son S.F. Metal particle combustion and nanotechnology // *Proceedings of the Combustion Institute*. — 2009. — V. 32, № 2. — P. 1819–1838.

24. Gill R.J., Badiola C., Dreizin E.L. Combustion times and emission profiles of micron-sized aluminum particles burning in different environments // *Combustion and Flame*. — 2010. — V. 157, № 11. — P. 2015–2023.

25. Beckstead M.W. Correlating Aluminum Burning Times // *Combustion Explosion and Shock Waves*. — 2005. — V. 41, № 5. — P. 533–546.

26. Corcoran A., Mercati S., Nie H., Milani M., Montorsi L., Dreizin E.L. Combustion of fine aluminum and magnesium powders in water // *Combustion and Flame*. — 2013. — V. 160, № 10. — P. 2242–2250.

27. Lynch P., Krier H., Glumac N. A correlation for burn time of aluminum particles in the transition regime // *Proceedings of the Combustion Institute*. — 2009. — V. 32, № 2. — P. 1887–1893.

28. Bazyn T., Krier H., Glumac N. Oxidizer and pressure effects on the combustion of 10-micron aluminum particles // *Journal of Propulsion and Power*. — 2005. — V. 21, № 4. — P. 577–582.

29. Ozerov E.S., Yurinov A.A. Combustion of particles of aluminum-magnesium alloys in water vapor // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. — 1977. — V. 13, № 6. — P. 778–780.

30. Борисов А.А., Кнорре В.Г., Комиссаров П.В., Маилков А.Е., Пчельников А.В., Трошин К.Я. Измерение задержек воспламенения и времен горения

предварительно перемешанных двухфазных сред // Химическая физика. — 2000. — Т. 19, №4. — С. 58–63.

31. Borisov A.A. Komissarov P.V., Troshin K.Ja., Kulikov A.V., Mel'nichuk O.I., Skachkov G.I. Khasainov B.A. Energy release kinetics in heterogeneous mixtures // Chemical Physics Reports. — 1998. — V.17, № 3. — P. 455–467.

32. Glorian J., Gallier S., Catoire L. On the role of heterogeneous reactions in aluminum combustion // Combustion and Flame. — 2016. — V. 168. — P. 378–392.

33. Olsen S.E., Beckstead M.W. Burn time measurements of single aluminum particles in steam and carbon dioxide mixtures // Journal of Propulsion and Power. — 1996. — V. 12, №. 4. — P. 662-671.

34. Turns S.R., Wong S.C. and Ryba E. Combustion of aluminum-based slurry agglomerates // Combustion Science and Technology. — 1987. — V. 54. — P. 299–318.

35. Hartman K.O. Ignition and combustion of aluminum particles in propellant flame gases // Proceedings of the 8th Joint Army Navy NASA Air Force Combustion Meeting. — 1971. — V. 1. — P. 1–24.

36. Prentice J.L. Combustion of laser-ignited aluminum droplets in wet and dry oxidizers // Proceedings of the 12th Aerospace Sciences Meeting. — Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics. — 1974. — P. 74–146.

37. Friedman R., Macek A. Ignition and combustion of aluminum particles in hot ambient gases // Combustion and Flame. — 1962. — V. 6. — P. 9–19.

38. Wilson R.P., Williams F.A. Experimental study of the combustion of single aluminum particles in O₂/Ar // Proceedings of the 13th Symposium on Combustion. — Pittsburgh: The Combustion Institute. — 1971. — P. 833–845.

39. Davis A. Solid Propellants: The combustion of particles of metal ingredients // Combustion and Flame. — 1963. — V. 7, № 4. — P. 359–367.

40. Marion M., Chauveau C. Gokalp I. Studies on the ignition and burning of aluminum particles // Combustion Science and Technology. — 1996. — V. 115, № 5-6. — P. 369–390.

41. Zenin A.A., Kusnezov G., Kolesnikov V. Physics of aluminum particle combustion at convection // Proceedings of the 38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. — Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics. — 2000. — P. 1–13.

42. Roberts T.A., Burton R.L., Krier H. Ignition and combustion of aluminum/magnesium alloy particles in O₂ at high pressures // Combustion and Flame. — 1993. — V. 92, № 1-2. — P. 125–143.

43. Dreizin E.L. Experimental study of aluminum particle flame evolution in normal and micro-gravity // Combustion and Flame. — 1999. — V. 116, № 3. — P. 323–333.

44. Melcher J.C., Burton R.L. Krier H. Combustion of aluminum particles in in solid rocket motor flows // Proceedings of the 36th Joint Army Navy NASA Air Force Combustion Meeting / Ed. R.S. Fry. — 1999. — V. 1. — P. 249–258.

45. Vlaskin M.S., Shkolnikov E.I., Bersh A.V. Oxidation kinetics of micron-sized aluminum powder in high-temperature boiling water // International Journal of Hydrogen Energy. — 2011. — V. 36, № 11. — P. 6484–6495.

46. Yavor Y., Goroshin S., Bergthorson J.M., Frost D.L., Stowe R., Ringuette S. Enhanced hydrogen generation from aluminum-water reactions // International Journal of Hydrogen Energy. — 2013. — V. 38, № 35. — P. 14992–15002.

47. Petrovic J, Thomas G. Reaction of aluminum with water to produce hydrogen. Study of issues related to the use of aluminum for on-board vehicular hydrogen storage. — Washington DC: US Department of Energy. — 2008. — 26 p.

48. Bunker B.C., Nelson G.C., Zavadil K.R., Barbour J.C., Wall F.D., Sullivan J.P. Hydration of passive oxide films on aluminum // Journal of Physical Chemistry B. — 2002. — V. 106, № 18. — P. 4705–4713.

49. Komissarov P.V., Ibraghimov R.H., Borisov A.A., Sokolov G.N. 2008. Efficiency of underwater explosion produced by fast injection of preheated aluminum particles in water // Proceedings of the 7th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions. — Moscow: TORUS PRESS. — V. 2. — P. 202–216.

50. Deng Z.Y., Ferreira J., Tanaka Y., Jinhua Y. Physicochemical mechanism for the continuous reaction of g-Al₂O₃ modified aluminum powder with water // *Journal of the American Ceramic Society*. — 2007. — V. 90, № 5. — P. 1521–1526.

51. Deng Z.Y., Ferreira J., Sakka Y. Hydrogen-generation materials for portable applications // *Journal of the American Ceramic Society*. — 2008. — V. 91, № 12. — P. 3825–3834.

52. Studart A.R., Innocentini M., Oliveira I.R., Pandolfelli V.C. Reaction of aluminum powder with water in cement-containing refractory castables // *Journal of the American Ceramic Society*. — 2005. — V. 25, № 13. — P. 3135–3143.

53. Ki W., Shmelev V., Finiakov S., Cho Y., Yoon W.S. Combustion of micro aluminum–water mixtures // *Combustion and Flame*. — 2013. — V. 160, № 12. — P. 2990–2995.

54. Athawale B.K., Asthana S.N., Singh H. Metallised fuel-rich propellants for solid rocket ramjet // *Defence Science Journal*. — 1994. — V. 44, № 4. — P. 269–278.

55. Fu Y.J., Wey Y. J., Zhang J.Z. Parametric study on the thrust of bubbly water ramjet with a converging-diverging nozzle // *Journal of Hydrodynamics*. — 2009. — V. 21, № 5. — P. 591–599.

56. Zhou L., Xie Z., Wei X. Comparison of underwater shock wave attenuation of a new insensitive high explosive with different explosives // *Combustion, explosion and shock waves*. — 2011. — V. 47, № 6. — P. 721–726.

57. Wang H., Zhu X, Cheng Y.S., Liu J. Experimental and numerical investigation of ship structure subjected to close-in underwater shock wave and following gas bubble pulse // *Marine Structures*. — 2014. — V. 39. — P. 90–117.

58. Adapaka S.K., Vepakomma B.R. Evaluation of plastic bonded explosive (PBX) formulations based on RDX, aluminum, and HTPB for underwater applications // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. — 2010. — V. 35, № 4. — P. 359–364.

59. Keshavarz M.H., Bagheri V., Damiri S. A simple method for reliable estimation of the bubble energy in the underwater explosion // *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*. — 2019. — V. 645, № 24. — P. 1402–1407.

60. Keshavarz M.H., Bagheri V.A. A simple correlation for assessment of the shock wave energy in underwater detonation // *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*. — 2019. — V. 645, № 18–19. — P. 1146–1152.

61. Xiao F., Gao W., Li J., Yang R. Effect of the aluminum particle size, solid content, and aluminum/oxygen ratio on the underwater explosion performance of aluminum-based explosives // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. — 2020. — V. 56, № 5. — P. 576–584.

62. Yao J., Zhang C., Liu W., Bai C., Zhao X., Sun B., Liu N. The explosion characteristics of diethyl ether-Al mixtures under different ambient conditions // *Combustion and Flame*. — 2021. — V. 227. — P. 162–171.

63. Du L., Nie P., Jin S., Chen K., Wang J. Influences of FOX-7 and NTO on the metal driven ability and underwater explosion power of HMX-based aluminized explosives // *Chemical Physics Letters*. — 2021. — V. 779, № 2. — 138881: 1–7.

64. Bai C., Zhang C., Liu W., Zhao X., Sun B., Yao J. Effect of nitromethane on fuel/air explosion characteristics under different ambient conditions // *Combustion and Flame*. — 2021. — V. 234. — 111632: 1–10.

65. Swisdak M.M. Explosion effects and properties. Part 2. Explosion effects in water. — Silver Spring: Naval Surface Weapons Center. — 1978. — 112 p.

66. Pontalier Q., Loiseau J., Goroshin S., Zhang F., Frost D.L. Blast enhancement from metalized explosives // *Shock Waves*. — 2021. — V. 31, № 3. — P. 203–230.

67. Frost D.L. Heterogeneous/particle-laden blast waves // *Shock Waves*. — 2018. — V. 28, № 3. — P. 439–449.

68. Kolev S.K., Tsonev T.T. Aluminized enhanced blast explosive based on polysiloxane binder // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. — 2021. — V. 46, № 2. — P. 1–14.

69. Peuker J.M., Krier H., Glumac N. Particle size and gas environment effects on blast and overpressure enhancement in aluminized explosives // *Proceedings of the Combustion Institute*. — 2013. — V. 34, № 2. — P. 2205–2212.

70. Vadhe P.P., Pawar R.B., Sinha R.K., Asthana S.N., Rao A.S. Cast aluminized explosives // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. — 2008. — V. 44, № 4. — P. 461–477.

71. Yen N.H., Wang L.Y. Reactive metals in explosives // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. — 2012. — V. 37, № 2. — P. 143–155.

72. Hu H., Chen L., Yan J., Feng H., Xiao C., Song P. Effect of aluminum powder on underwater explosion performance of CL-20 based explosives // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. — 2019. — V. 44, № 7. — P. 837–843.

73. Сюй С., Чень Ю., Чень С., Ву Д., Лю Д.Б. Теплота сгорания порошка Al/V и эффективность его применения в металлизированных взрывчатых веществах при подводном взрыве // *Физика горения и взрыва*. — 2016. — Т. 52, № 3. — С. 97–104.

74. Борисов А.А., Комиссаров П.В., Маилков А.Е., Ельшин Р.Н., Силакова М.А. Взрывное взаимодействие струй богатых алюминием реагирующей гетерогенной смеси с водой // *Химическая физика*. — 2002. — Т. 21, № 10. — С. 92–96.

75. 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.

76. Komissarov P.V., Borisov A.A., Sokolov G.N., Lavrov V.V. Experimental comparison of shock and bubble heave energies from underwater explosion of ideal he and explosive composite mixtures highly enriched with aluminum // *Physics Procedia*. — 2015. — V. 72. — P. 333–337.

77. Zhu F., Chou C.C., Yang K.H. Shock enhancement effect of lightweight composite structures and materials // *Composites. Part B: Engineering*. — 2011. — V. 42, № 5. — P. 1202–1211.

78. Галкин В.В., Гильманов Р.А., Дроговейко И.З. Взрывные работы под водой. — Москва: Недра. — 1987. — 232 с.

79. Тимофеев Е.И., Гельфанд Б.Е., Гумеров А.Г., Кофман М.М. Поленов А.Н., Хомик С.В. Влияние пузырькового экрана на ударно-волновое возмущение в жидкости // Физика горения и взрыва. — 1985. — № 3. — С. 98–102.

80. Гельфанд Б.Е., Губанов А.В., Тимофеев Е.И. Взаимодействие ударных волн с защитными экранами в жидкости и двухфазной среде // Журнал прикладной механики и теоретической физики. — 1982. — Т. 131, № 1. — С. 118–123.

81. Комиссаров П.В., Соколов Г.Н., Ермолаев Б.С., Борисов А.А. Смесевые составы для подводных взрывов с усиленным действием за счет включения воды как внешнего окислителя и их взрывные характеристики // Физико-химическая кинетика в газовой динамике — 2011. — Т. 12, № 5. — С. 1–27.

82. Mottard E.J., Shoemaker C.J. Preliminary investigation of an underwater ramjet powered by compressed air. — Washington: National aeronautics and space administration. — 1961. — 26 p.

83. Miller T.F., Herr J.D. Green rocket propulsion by reaction of Al and Mg powders and water // Proceedings of the 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit / Ed. C. Williams. — Fort Lauderdale: American Institute of Aeronautics and Astronautics Incorporated. — 2004. — P. 4037–4047.

84. Burnett W. An interior ballistics model for liquid propellant guns. — Indian Head: U.S. Naval Ordnance Station. — 1976. — 444 p.

85. Bracuti A.J., Chiu D.S, MacPherson A.K. Advanced propulsion concept: step chamber for bulk-loaded gun. — Picatinny Arsenal: U.S. Army Armament Research, Development and Engineering Center. — 1995. — 13 p.

86. Xue X., Yu Y., Zhang Q. Study on the effect of distance between the two nozzle holes on interaction of high pressure combustion-gas jets with liquid // Energy Conversion and Management. — 2014. — V. 85. — P. 675–686.

87. Zhao Y.F., Irons G.A. The breakup of bubbles into jets during submerged gas injection // Metallurgical Transactions B. — 1990. — V. 21, № 6. — P. 997–1003.

88. He M., Qin L., Liu Y. Oscillation flow induced by underwater supersonic gas jets from a rectangular laval nozzle // *Procedia Engineering*. — 2015. — V. 99. — P. 1531–1542.

89. Yang Y., He M. Numerical study on operating characteristics of a magnesium-based fuel ramjet // *Acta Astronautica*. — 2012. — V. 79. — P. 96–106.

90. Ягодников Д.А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов. — Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2009. — 433 с.

91. Ягодников Д.А. Антонов Ю.В., Власов Ю.Н. Моделирование испарения полидисперсной совокупности капель воды в камере сгорания гидрореактивного двигателя // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение»*. — 2011. — Т. 85, № 4. — С. 71–82.

92. Терехов В.И., Терехов В.В., Шишкин Н. Е., Би К.Ч. Экспериментальное и численное исследования нестационарного испарения капель жидкости // *Инженерно-физический журнал*. — 2010. — Т. 83, № 5. — С. 829–836.

93. Miller T.F., Walter J.L., Kiely D.H. A next-generation AUV energy system based on aluminum-seawater combustion // *Proceedings of the 2002 Workshop on Autonomous Underwater Vehicles / Ed. C.P. Chairman*. — Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers. — 2002. — P. 111–119. — 182 p.

94. Чернышов Е.А., Романов А.Д. Высокометаллизированное топливо на основе алюминия и его применение // *Технические науки – от теории к практике*. — 2013. — № 24. — С. 69–73.

95. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Гидродинамика. — Москва: Наука. — 1986. — Т.6. — 733 с.

96. Leiper G.A., Cooper J. Reaction rates and the charge diameter effect in heterogeneous explosives // *Proceedings of 9th symposium on detonation / Ed. W.J. Morat*. — Portland: Sandia National Laboratories. — 1989. — V. 1. — P. 197–206. — 855 p.

97. Leiper G. A., Cooper J. Reaction of aluminium and ammonium nitrate in nonideal heterogeneous explosives // *Proceedings of 10th symposium on detonation /*

Ed. W.J. Morat. — Boston: Naval Surface Warfare Center. — 1993. — P. 267–275. — 1053 p.

98. Ermolaev B.S., Khasainov B.A., Presles N., Vidal P. A simple approach for modelling reaction rates in shocked multi-component solid explosives // Proceedings 2nd European combustion meeting / Ed. V. Dias. — Louvain-la-Neuve: Combustion Institute. — 2005. — P. 1–6.

99. Имховик Н.А., Андреев С.Г., Соловьев В.С. Уравнения состояния продуктов детонации конденсированных взрывчатых веществ // Труды МГТУ. — 1992. — № 557. — С. 17–41.

100. Имховик Н.А., Мачнева И.П., Соловьев В.С. Моделирование детонационных и энергетических характеристик низкоплотных взрывчатых составов // Оборонная техника. — 1995. — № 4. — С. 9–15.

101. Ермолаев Б.С., Комиссаров П.В., Соколов Г.Н., Борисов А.А. К теории неидеальной стационарной детонации тройных смесей нитрометан + перхлорат аммония + алюминий // Химическая физика. — 2012. — Т. 31, № 9. — С. 55–67.

102. Andersen W.H., Pesante R.E. Reaction rate and characteristics of ammonium perchlorate in detonation // Proceedings 8th symposium on combustion. — Baltimore: Williams and Wilkins Co. — 1963. — P. 705–710. — 1164 p.

103. Price D., Clairmont A.R., Erkman J.O. Explosive behavior of aluminized ammonium perchlorate // Combustion and Flame. — 1973. — V. 20, № 3. — P. 389–400.

104. Ermolaev B.S., Khasainov B.A., Presles H.N. Formal characteristics of aluminium burning rate law in non-ideal detonations of ammonium nitrate based mixtures // Proceedings 34th International Pyrotechnics Seminar “EUROPYRO 2007”. — Beaune: International Pyrotechnics Society. — 2007. — V. 1. — P. 323–337.

105. Ермолаев Б.С., Сулимов А.А. Конвективное горение и низкоскоростная детонация пористых энергетических материалов. — Москва: Торус Пресс. — 2017. — 400 с.

106. Комиссаров П. В., Соколов Г. Н., Ермолаев Б. С., Борисов А. А. Конвективное горение и детонационная способность смесей перхлорат аммония —

алюминий – нитрометан, богатых алюминием. 1. Эксперимент// Химическая физика. — 2011. — Т. 30, № 6. — С. 61–71.

107. 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.

108. Ермолаев Б. С., Шевченко А. А, Долгобородов А. Ю., Маклашова И.В. Оценка скоростей химического превращения смесевых взрывчатых веществ, основанная на экспериментальных данных по псевдоидеальной детонации // Химическая физика. — 2019. — Т. 38, № 2. — С. 52–62.

109. 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.

110. Stromsoe E., Eriksen S.W. Performance of high explosive in underwater applications. Part 2: Aluminized explosives // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. — 1990. — V. 15, № 2. — P. 52–53.

111. Беляев А.Ф., Боболев В.К., Коротков А.И., Сулимов А.А., Чуйко С.В. Переход горения конденсированных систем во взрыв. — Москва: Наука. — 1973. — 292 с.

112. Harris P., Avrami L. Some physics of the Gruneisen parameter. — Dover: United State Army Picatinny Arsenal. — 1972. — 39 p.

113. URL: <http://www.ihed.ras.ru/rusbank/catsearch.php> (дата обращения 03.09.2023).

114. Имховик Н.А., Соловьев В.С. Термодинамический расчет параметров детонации многокомпонентных смесевых взрывчатых составов // Вестник МГТУ. Серия «Машиностроение». — 1994. — № 3. — С. 50–54.

115. Dobratz B.M., Crawford P.C. Explosives handbook. Properties of chemical explosives and explosive simulants. — Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory. — 1985. — 526 p.

116. Khasainov B.A., Ermollaev B.S., Presles H.-N., Vidal P. On the effect of grain size on shock sensitivity of heterogeneous high explosives // Shock Waves. — 1997. — V. 6, № 2. — P. 89–105.

117. Зельдович Я.Б. Теория детонации. — Москва: Государственное издательство технико-теоретической литературы. — 1955. — 268 с.

118. Mader C.L. Numerical modeling of detonations. — Berkley: University of California Press. — 1979. — 485 p.

119. Swift D.C., Lambourn B.D. Review of developments in the w-b-l detonation model // Proceedings of 10th symposium on detonation / Ed. W.J. Morat. — Boston: Naval Surface Warfare Center. — 1993. — P. 386–393. — 1053 p.

120. Андреев С.Г., Бабкин А.В., Баум Ф.А, Имховик Н.А., Кобылкин И.Ф., Колпаков В.И., Ладов С.В., Одинцов В.А., Орленко Л.П., Охитин В.Н., Селиванов В.В., Соловьев В.С., Станюкович К.П., Чельшев В.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва. Том 1. — Москва: Физматлит. — 2002. — 832 с.

121. 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.

122. Lavrov V.V., Savchenko A.V. Detonation properties of emulsion explosive in different confinements. 1. Critical parameters of detonation // Theory and Practice of Energetic Materials. — 2011. — V. 9. — P. 530–535.

123. Abrahams J.L. Underwater drilling and blasting for rock dredging // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. — 1974. — V. 56, № 1. — P. 463–468.

124. Кедринский В.К. Распространение возмущений в жидкости, содержащей пузырьки газа // Прикладная механика и техническая физика. — 1968. — № 4. — С. 29–34.

125. 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.

126. Ellingsen K., Risso F. On the rise of an ellipsoidal bubble in water: oscillatory paths and liquid-induced velocity // *Journal of Fluid Mechanics*. — 2001. — V. 440. — P. 235–268.

127. Clift R., Grace J.R., Weber M.E. *Bubbles, drops and particles*. — London: Academic Press. — 1978. — 381 p.

128. Ладыженский Р.М. Исследование движения воздушного пузырька в воде при высоких значениях Re // *Журнал прикладной химии*. — 1954. — Т. 27, № 1. — С. 22–32.

129. Городецкая А.В. Скорость поднятия пузырьков в воде и водных растворах при больших числах Рейнольдса // *Журнал физической химии*. — 1949. — Т. 23, № 1. — С. 71–77.

130. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. *Гидродинамика газожидкостных систем*. — Москва: Энергия. — 1976. — 296 с.

131. Milgram J.H. Mean flow in round bubble plumes // *Journal of Fluid Mechanics*. — 1983. — V. 133. — P. 345–376.

132. Paterson S., Begg A.H. Underwater explosion // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. — 1978. — V. 3, № 1–2. — P. 63–69.

133. Komissarov P.V., Lavrov V.V., Basakina S.S. Directional enhancement of underwater explosion produced by aluminized mixtures in bubbled media // *Proceeding of the 44th International Pyrotechnics Seminar*. — Tours: International Pyrotechnic Society. — 2019. — P. 450–459. — 690 p.