

---

---

**ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ  
И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ**

---

---

УДК 534.222

*Светлой памяти А.А. Борисова посвящается*

**УСИЛЕНИЕ ВЗРЫВНОЙ ВОЛНЫ ПОДВОДНОГО ВЗРЫВА  
МЕТАЛЛИЗИРОВАННОГО ЗАРЯДА В НАПРАВЛЕНИИ  
ПУЗЫРЬКОВОГО КАНАЛА В СПЛОШНОЙ ВОДЕ**

© 2019 г. П. В. Комиссаров<sup>1\*</sup>, А. А. Борисов<sup>1</sup>, С. С. Басакина<sup>1</sup>, В. В. Лавров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем химической физики Российской академии наук, Черноголовка, Россия

\*E-mail: komissarov@center.chph.ras.ru

Поступила в редакцию 02.03.2019;

после доработки 10.04.2019;

принята в печать 22.04.2019

Представлены результаты экспериментальных исследований подводных взрывов идеально и неидеально детонирующих зарядов в сплошной воде и в воде, содержащей пузырьки воздуха. Заряды весом до 50 г были взорваны в металлическом резервуаре, заполненном водой. Регистрировались параметры волн сжатия в воде. Показан эффект направленного распространения взрывной волны в воде вдоль канала, заполненного пузырьками воздуха. Также обсуждается механизм неидеальных взрывов высокометаллизированных составов в воде, в том числе взрывы в пузырьковой среде.

*Ключевые слова:* детонационная способность, подводный взрыв, металлизированный взрывчатый состав, направленный взрыв, взрыв в гетерогенной среде, гидродинамика, взрывные волны.

**DOI:** 10.1134/S0207401X19080053

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что в некоторых случаях наблюдается усиление гидроударной волны (ГУВ) в воде при ее столкновении с препятствием. Например, в случае, когда ГУВ проходит через пузырьковую завесу при наличии за ней жесткой поверхности. Такое явление было описано в работе [1]. Оно особенно часто встречается при исследовании пузырькового слоя в ограниченном объеме жидкости. Подобное усиление ударной волны также отмечено и в работе [2] в случае, когда ударная волна 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 работе [3], 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 [2, 4] также отмечалось снижение интенсивности ударной волны при ее прохождении через пузырьковую завесу. Однако в работе [2] было отмечено, что между защищаемым объектом и завесой оставался зазор сплошной воды шириной 0.5–1 м, который предотвра-

щал разрушение стены. Таким образом, в случае прохождения ГУВ сквозь гетерогенную сжимаемую среду происходит ее торможение при одновременном снижении давления на фронте и увеличении длительности импульса положительного сжатия, что приводит к существенному усилению действия на препятствие. Однако в случае, когда 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 гомогенному участку снижается из-за диссипации в гетерогенном слое позади фронта. В работе [5] было показано, что амплитуда падающей ГУВ после прохождения через пузырьковую завесу значительно ниже, чем в сплошной воде.

Интересны также эффекты, сопровождающие взрывы высокометаллизированных смесевых составов в воде. Под термином “высокометаллизированные” мы понимаем составы, при взрыве которых только часть избыточного металла реагирует с продуктами детонации, содержащими окислительные компоненты (см. табл. 1). При этом непрореагировавший избыточный металл сохраняется готовым для вступления в реакцию с окружающей водой до момента начала интенсивного смешения. На практике это составы, в которых соотношение

Таблица 1. Характеристики используемых высокометаллизованных смесей

Компонент	Средний размер частиц, мкм	Состав 1 : 1	Состав 1.5 : 1	Состав 2 : 1
		доля в составе в граммах (вес.%)		
Алюминий марки ПАП-2	10 × 10 × 1	11.12 (41.5)	13.34 (50)	14.8 (53)
ПХА	40	11.12 (41.5)	8.90 (33)	7.4 (30)
Нитрометан	–	4.56 (17)		
Al/O		1.31	1.85	2.26
$\rho$ , г/см <sup>3</sup>		1.27	1.22	1.18

Al/O составляет до 2.36 и которые содержат до 70 вес.% металла [6]. В работах [7, 8] наблюдался импульс вторичного давления в случае, когда высокометаллизованные реагирующие смеси составы (типа порошок алюминия – перхлорат аммония (ПХА) – нитрометан) 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. Экспериментально также показано [6, 7], что образование реагирующего многофазного облака длится не менее 500 мкс. Реакция же в сплошной воде протекает намного дольше, чем разгрузка ГУВ. Возможно, 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 продуктов детонации при их расширении приводит к росту размеров гетерогенного облака и интенсификации смешения. Начальное расширение продуктов взрыва и их смешение с окружающей окислительной средой, таким образом, будут 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 увеличения температуры при сжатии), а также будет способствовать генерации вторичных импульсов сжатия. Измерения продемонстрировали увеличение длительности импульса ГУВ минимум в 1.5 раза в

экспериментах с пузырьковой колонной в сравнении с аналогичными опытами в сплошной воде [5]. Реакция протекает интенсивно по всему объему пузырьковой жидкости, на что указывало наблюдаемое свечение.

Вышеотмеченные явления, сопровождающие взрыв в воде с пузырьками, а также особенности взаимодействия ГУВ с пузырьковой средой стали основой для организации направленного подводного взрыва. Если при взрыве высокометаллизованного заряда в насыщенной пузырьками воздуха среде последняя будет простираться от заряда до препятствия, на которое необходимо воздействовать, механическое действие энергии взрыва и вторичных реакций металла с водой также будет реализовано в направлении такого гетерогенного канала в сплошной воде. Причинами такого усиленного действия взрыва в направлении, заданном пузырьковым каналом, будут следующие факторы:

- при взрыве высокометаллизованного заряда продукты детонации внутри пузырьковой области более интенсивно смешиваются с водой и паром из-за более высокой проницаемости среды;
- реакция избыточного металла с водой происходит быстрее, чем в сплошной воде, и поэтому генерируемые волны сжатия способны поддерживать уходящую ГУВ, которая распространяется медленнее в гетерогенной среде, чем в сплошной воде;
- векторы скорости частиц в гетерогенной реагирующей среде направлены в сторону препятствия, поскольку продукты расширяются преимущественно вдоль пузырькового канала в направлении наиболее проницаемой (сжимаемой) среды;
- при столкновении волны сжатия с препятствием длительность импульса сжатия увеличивается из-за торможения сжимаемой гетерогенной среды;
- непрореагировавшие частицы металла начинают гореть во время торможения и вызывают дополнительное сжатие гетерогенной среды из-за резкого повышения температуры. Такое дожига-

ние также увеличивает длительность и амплитуду импульса.

Очевидно, что существуют некоторые оптимальные закономерности между массой, составом заряда, размерами и физическими характеристиками пузырькового канала, а также расстоянием от заряда до препятствия. Поиску таких закономерностей посвящена настоящая работа.

### ЭКСПЕРИМЕНТ

В вертикальном открытом цилиндрическом стальном резервуаре диаметром 2.2 м и глубиной 3.5 м с полуэллиптическим дном, заполненном водой, размещался смесевой заряд (см. рис. 1). Объем резервуара составлял около 13.5 м<sup>3</sup>. Действие волны сжатия на препятствие оценивалось путем измерения механического импульса, сообщенного волной сжатия преграде в виде подвижного цилиндрического препятствия (импульсомера), размещенного выше заряда, погруженного на 0.6 м в воду и способного двигаться вертикально (см. рис. 1). На препятствии был размещен пьезоакселерометр. Более подробно методика измерения импульса ГУВ описана в работах [9, 10]. Регистрация давления в воде осуществлялась двумя пьезодатчиками давления, установленными на уровне размещения заряда (на половине расстояния между зарядом и стенкой емкости) и на уровне нижнего торца импульсомера. Также проводилась скоростная съемка процессов на поверхности емкости и вертикально сверху вниз в направлении на импульсомер. В последнем случае камера могла регистрировать повторные вспышки свечения при столкновении взрывной волны с нижним торцом импульсомера.

Между зарядом и импульсомером располагался цилиндрический канал из барботированной воды, образованный цилиндрической колонной всплывающих пузырьков (см. следующий подраздел). Исследуемые заряды подвешивались на одном тросе с генератором пузырьков. При этом трос, закрепленный на импульсомере и снабженный грузом, обеспечивал соосность всей конструкции относительно емкости.

В экспериментах были определены параметры волн сжатия в воде и характеристики движения импульсомера при воздействии гидровзрывной волны в зависимости от следующих параметров:

- отношения  $A_l/O$  в металлизированных составах зарядов;
- длины пузырькового канала;
- положения заряда относительно начала пузырьковой колонны;
- режима подачи воздуха в пузырьковый канал.

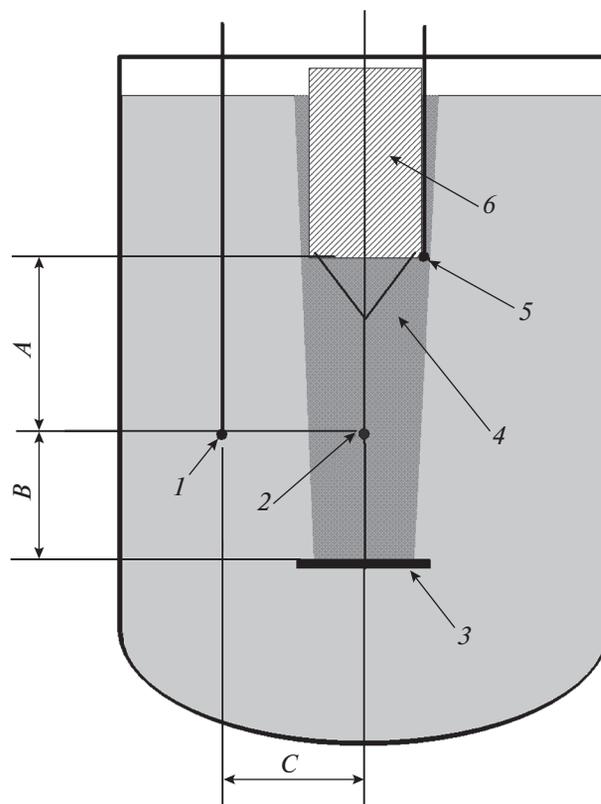


Рис. 1. Схема проведения экспериментов: 1 – датчик D<sub>1</sub>, 2 – заряд, 3 – генератор пузырьков, 4 – пузырьковый канал в воде, 5 – датчик D<sub>2</sub>, 6 – импульсомер.

### Пузырьковый канал от заряда к препятствию

Вертикальный пузырьковый канал был сформирован специальным устройством, закрепленным ниже заряда (см. рис. 2). Устройство для создания пузырьков представляло собой закрепленный по спирали на крестообразной раме полудюймовый шланг из поливинилхлорида длиной 4.5 м, перфорированный 250 отверстиями с шагом 1.5–2 см. Отверстия в шланге имели вид коротких прорезей, раскрывающихся при подаче воздуха в шланг. Подобная конструкция была выбрана из следующих соображений:

– Пузырьковая колонна должна быть цилиндрической формы и расположена соосно с емкостью, зарядом и импульсомером.

– Пузырьковая колонна должна быть максимально прозрачна для ГУВ и не вызывать снижения ее амплитуды.

– Известно, что при подводных взрывных работах для гашения гидродарных волн применяются воздушно-пузырьковые завесы [2]. При этом характерная для их работы величина снижения давления ГУВ  $B_p = 6$  определяется как

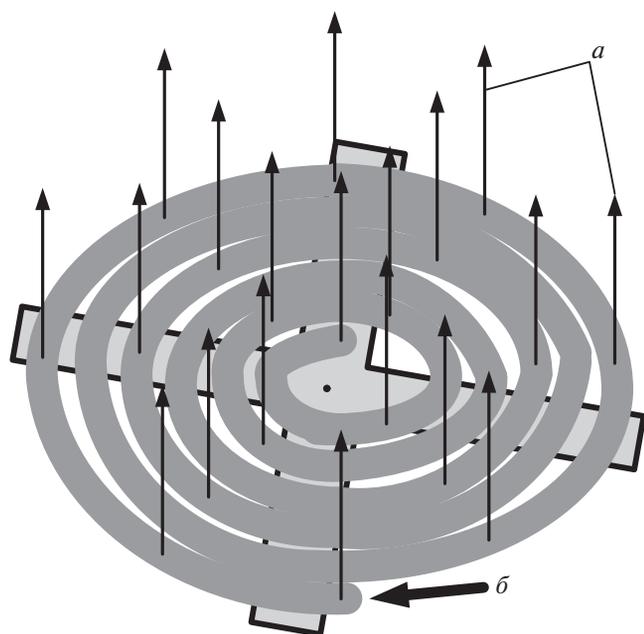


Рис. 2. Генератор пузырькового канала: *a* – пузыри воздуха, *б* – подача воздуха.

$$B_p = \frac{P_1 - P_0}{P_{\text{экp}} - P_0}, \quad (1)$$

где  $P_1$  – амплитуда падающей волны;  $P_{\text{экp}}$  – амплитуда волны, прошедшей за экран;  $P_0$  – гидростатическое давление. Основной характеристикой таких экранов является удельный расход воздуха на погонный метр завесы. В работе [11] указано, что эффект гашения ГУВ наступает в случае удельного расхода в  $0.24 \text{ м}^3/(\text{мин} \cdot \text{м})$ . В использованном в этой работе генераторе пузырьков величина удельного расхода не превышала данный показатель.

– При воздействии ГУВ на пузырьки значительная часть энергии тратится на их сжатие. В работе [11] показано, что для пузырьков с диаметром около 1 мм время охлаждения после сжатия одного порядка с общим временем сжатия, а значит, при сильных сжатиях часть тепла будет передаваться окружающей воде. Теплопередача от больших пузырей намного медленнее, так что потери энергии волной также будут много меньше. К тому же, когда волна движется по колонне пузырьков, акустическая скорость в которой существенно меньше, чем в сплошной воде, ударно-сжатая вода вокруг колонны разгружается внутрь последней, снижая эффект потери энергии. При большем размере пузырей давление внутри колонны уравнивается с внешним давлением в течение более длительного времени. Поэтому работа волны сжатия, направленная против сил поверхностного натяжения, меньше в случае больших пузырей.

– Для случая гашения ГУВ пузырьковыми завесами известно, что основным параметром, определяющим эффективность, является внутренняя энергия газа, содержащаяся в  $1 \text{ м}^3$  завесы. В работе [2] указано, что если падающая волна имеет удельную энергию

$$E_0 \geq \frac{P_0 \phi}{\gamma - 1} h, \quad (2)$$

где  $h$  – ширина завесы,  $\phi$  – объемное содержание пузырей в воде, а  $\gamma$  – показатель адиабаты воздуха, то снижения амплитуды не происходит. В эксперименте энергия волны, падающей на завесу, составляет порядка  $10^3$ – $10^5 \text{ Дж/м}^2$ . Предполагая, что ширина завесы в нашем случае составит длину пузырькового канала (1.5 м), объемное содержание пузырьков, при котором произойдет гашение волны сжатия, составит 0.27. Поэтому генератор пузырьков имел такой расход, который обеспечивал на порядок меньшее значение удельного объемного содержания пузырей в воде с целью гарантированного пропуска волны сжатия к препятствию. Эксперименты проводились при трех различных значениях объемного содержания пузырьков в воде (соответственно режимы 1, 2, 3 в табл. 2). Температура подаваемого воздуха была постоянной, равной воде в емкости (около  $5^\circ\text{C}$ ).

Скоростная видеосъемка пузырьковой колонны, проведенная непосредственно в емкости при работе генератора пузырьков, показала некоторые особенности сформированного из множества всплывающих пузырьков гетерогенного канала в воде, перечисленных ниже.

– Размеры пузырьков не зависят от давления подачи воздуха в отличие от указанного в [2].

– Пузырьки движутся по спиралевидным траекториям и редко сталкиваются. После слияния при столкновении пузырьки практически сразу разделяются. Таким образом, на протяжении всей высоты пузырьковой колонны средний размер пузырька не изменяется.

– Большинство пузырьков имеет линзоподобную форму. В работе [12] представлена экспериментальная зависимость скорости всплытия единичного пузыря в воде от его диаметра. При увеличении диаметра (до  $\sim 1.5 \text{ мм}$ ) наблюдается увеличение скорости всплытия, соответствующее вязкому обтеканию во вневостоксовской области чисел Рейнольдса ( $1 < \text{Re} < 500$ ). Далее наблюдается падение скорости всплытия из-за резкой деформации (сплющиванием) пузырей и связанного с этим ростом гидравлического сопротивления. При этом происходит переход от вязкого сопротивления к сопротивлению формы (при диаметре до  $\sim 5 \text{ мм}$ ). Таким образом, при данной анизотропии пузырьковой колонны площадь перекрытия сечения пузырьками будет больше в направлении распространения ГУВ. Влияние анизотропии пу-

Таблица 2. Параметры пузырькового канала при различных режимах подачи воздуха

Режим расхода воздуха	Давление, в подающей трубе, кПа	Расход воздуха, л/мин	Объемное содержание пузырьков в воде, об. %	Средняя скорость всплытия пузырьков, на периферии колонны, м/с	Средний размер пузырьков, мм	Среднее отношение диаметра к высоте пузырька
1	6	10	0.4	0.35	4–5	1–2
2	24	48	1	0.6	10	2.5–4
3	54	120	2.6	0.6	10	2.5–4

Таблица 3. Измеренные скорости всплытия пузырьков в пузырьковом канале при среднем расходе воздуха через генератор пузырьков 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	1–1.35	0.48–0.58
42	1	0.42

зубчатой колонны на параметры волны сжатия нами не изучалось, однако такие эксперименты стоит провести в будущем.

– Согласно данным из [12], за некоторым минимумом скорости всплытия следует ее возрастание с увеличением объема пузырька. Скорость всплытия пузырьков не превышает 0.4 см/с. Однако съемка всплытия пузырьков в этой работе показала на порядок большие скорости всплытия, чем указанные в [12] для единичного пузырька (см. табл. 3). Очевидно, что при всплытии колонны пузырьков формируется вихревое движение воды в емкости, рождающее вертикальное восходящее течение в центре и нисходящее у стенок. Скорость всплытия пузырьков непостоянна и снижается от центра, где течение наиболее сильное, к периферии колонны (табл. 3). В работе [13] 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 радиуса пузырька. Это согласуется по порядку величины с полученными в этой работе данными о скоростях всплытия.

– Форма пузырьковой колонны близка к цилиндрической с диаметром 40 см. Однако при всплытии пузырьков на 30 см над генератором поперечный размер колонны несколько (на 5–10%)

уменьшается. Вероятно, это связано с поворотом вихревого движения воды от центростремительного к вертикальному течению по мере набора скорости пузырьками. При дальнейшем всплытии поперечный размер колонны несколько увеличивается из-за взаимного расталкивания пузырьков вследствие снижения гидростатического давления. В пределах высоты пузырькового канала, использованного в этой работе, подобный эффект незначителен и им можно пренебречь при расчетах удельного газосодержания в пузырьковом канале.

### Исследованные заряды

Заряды представляли собой пластмассовые трубки диаметром 20 мм с толщиной стенки 4 мм, заполненные исследуемым смесевым ВВ. В качестве основного конденсированного ВВ, с которым проводилось сравнение действия высокометаллизированных составов, служил аммонит марки 6ЖВ насыпной плотности (1.12 г/см<sup>3</sup>). Скорость детонации аммонита по данным контрольного измерения составила 4500 м/с. Этот выбор был обусловлен плотностью насыпного аммонита, близкой к плотности исследованных неидеальных смесей, а также близкой скоростью детонации, так как по данным из работы [5] ожидаемая скорость детонации составляла 2–3 км/с. Во всех

опытах, кроме опыта по калибровке емкости по методу, изложенному в работах [14, 15], масса заряда составила 30 г. Неидеальные металлизированные составы (см. табл. 1) загружались в оболочку с легким подпрессовыванием рукой. Длина сформированного таким образом заряда оказывалась равной 9–10 см. Используемые неидеальные смеси не детонируют напрямую от капсуля-детонатора, и поэтому над смесью размещали промежуточный детонатор из 4 г аммонита № 6 ЖВ насыпной плотности.

### *Параметры детонации составов в условиях эксперимента*

Ввиду того, что в экспериментах использовались сравнительно короткие заряды (до четырех калибров) в малопрочных полипропиленовых оболочках, вопрос о наличии полноценной детонации в зарядах оставался актуальным. Предварительные опыты и параметрическое моделирование детонации тройных составов типа алюминий + ПХА + нитрометан, проведенные в [5, 8] 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 (ПП) или полиэтиленовые (ПЭТ) трубы близкого диаметра длиной до 500 мм, погружались в воду на глубину, равную глубине размещения заряда в цилиндрической емкости (как на рис. 1), и инициировались различными источниками: навеской аммонита № 6ЖВ, навеской ТЭНа, путем перехода горения в детонацию стехиометрического состава алюминий (марки ПАП-2) + ПХА (частицы размером 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 (с толщиной стенки 4 мм), полученных ранее в [5], 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.

Результаты измерений скоростей детонации представлены в табл. 4. Рассмотрим полученные результаты. Опыты показали снижение скорости детонации в зарядах с составом 1 : 1 с инерциаль-

ным подпором оболочки водой с 3.2 до 3 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). Различные источники инициирования дали близкие скорости детонации в зарядах с инерциальным подпором водой. Так, использование в качестве промежуточного детонатора навески ТЭНа увеличило среднюю скорость на 70 м/с. При этом инициирование путем перехода горения в детонацию в заряде с инерциальным подпором оболочки водой дает близкое значение скорости:  $(2.9 \pm 0.1)$  м/с. В более богатых алюминием зарядах (например, заряд с составом 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 диаметрах заряда 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.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### *Взрыв идеального ВВ в сплошной воде*

Сначала был проведен реперный эксперимент с идеально детонирующим зарядом аммонита № 6ЖВ на глубине в 135 см. Результаты эксперимента представлены на рис. 3. Дадим пояснение к этому рисунку. В нижней части рисунка показаны профили давления до момента полной разгрузки. Время указано от момента инициирования. В верхней части приведены построенные путем обработки сигнала акселерометра зависимости от времени набранной импульсометром скорости, кинетической энергии и его абсолютного перемещения. На основе полученных диаграмм определялись максимальные уровни давления на обоих датчиках, а также максимальное значение набранной кинетической энергии, максимальное перемещение и максимальная скорость импульсометра (см. табл. 5). На основе сигнала нижнего датчика давления  $D_1$  определена длительность  $\tau$  затухания амплитуды ГУВ в  $e$  раз и рассчитана волновая составляющая энергии ГУВ,  $e_s$ , по методу из [14, 15]. Полученные значения энергии ударной волны для аммонита составили 0.64 МДж/кг, что ниже данных для ТНТ (0.94–0.99 МДж/кг в [16] и 1.01 МДж/кг в [14]), в то время как теплоты взрывов у обоих ВВ близки. Такое снижение объясняется низкой плотностью заряда аммонита. На профиле скорости присутствуют колебания, связанные с вибрациями, однако во всех опытах виден двухстадийный процесс разгона импульсометра. Для исключения влияния упругих колебаний импульсометра на зависимость скорости от времени данные по

Таблица 4. Результаты измерений установившейся скорости детонации в высокометаллизированных зарядах в различных условиях

Номер эксперимента	Оболочка	Смесь	Инициатор	$d$ , мм	$l$ , мм	$S$ , мм	$D$ , км/с	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>
1	ПП + вода	1 : 1	6ЖВ 4 г	21.4	235	4	$3.00 \pm 0.12$	1.18
2	ПП + вода	1.5 : 1	6ЖВ 4 г	21.2	240	4	$2.41 \pm 0.08$	1.25
3	ПП + вода	2 : 1	6ЖВ 4 г	20.7	238	4	$1.92 \pm 0.10$	1.29
4	ПП + вода	1 : 1	ТЭН 2.5 г	21.4	236	4	$3.07 \pm 0.09$	1.17
5	ПЭТ	1 : 1	6ЖВ 4 г	21.3	211	3	$2.47 \pm 0.09$	1.32
6	ПЭТ	1 : 1	6ЖВ 4 г	21.2	156	3	$2.33 \pm 0.04$	1.36
7	сталь	1 : 1	ПГД	18	500	4	$3.2 \pm 0.22$	1.46
8	сталь	2 : 1	ПГД	18	500	4	$2.4 \pm 0.3$	1.35
9	ПЭТ + вода	1 : 1	ПГД	21	400	3	$2.9 \pm 0.1$	1.45

Примечание:  $d$  – внутренний диаметр оболочки,  $l$  – длина оболочки,  $S$  – толщина оболочки.

скорости были подвергнуты обработке отрезающим фильтром Фурье с частотой среза, равной собственной частоте импульсомера. Двухступенчатое движение импульсомера может быть объяснено следующим образом: некоторое временное торможение, вероятно, связано с разгрузкой ГУВ после достижения поверхности воды, после чего ускорение снова начинает увеличиваться за счет потока воды, направленного к поверхности.

Для сравнения проведен взрыв заряда гексогена массой 30 г (опыт № 16 в табл. 5). Принципиального отличия от аммонита не было – при существенно больших амплитудах ГУВ энергия движения импульсомера изменилась незначи-

тельно. При этом энергия ГУВ выше, чем в опыте с аммонитом, в полном соответствии с более высокими энергетическими характеристиками ВВ.

#### Взрыв в воде с пузырьковым каналом

Для определения влияния на гидродинамическую картину эксперимента с конденсированным ВВ наличия в емкости пузырькового канала был проведен опыт, в котором заряд аммонита массой 30 г был взорван в окружении пузырьковой колонны на глубине 1.35 м. Генератор пузырьков располагался ниже заряда на 0.5 м и был настроен на второй режим расхода воздуха (см.

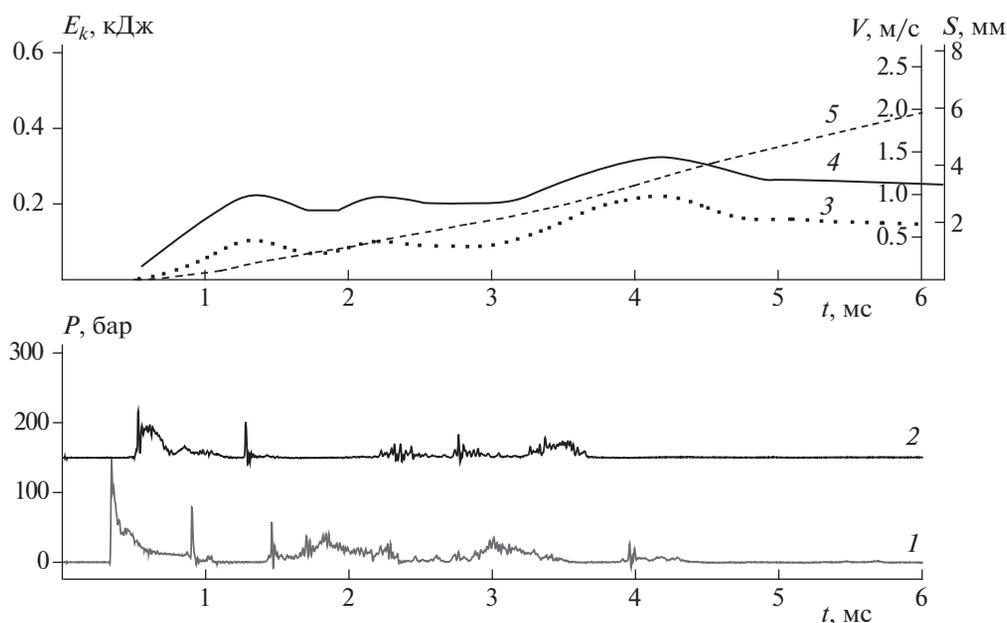


Рис. 3. Пример зарегистрированного сигнала и результатов его обработки: 1 – давление на нижнем датчике  $D_1$ , 2 – давление на верхнем датчике  $D_2$ , 3 – кинетическая энергия ( $E_k$ ), 4 – скорость ( $V$ ), 5 – перемещение ( $S$ ).

Таблица 5. Сводная таблица результатов экспериментов

№	Тип ВВ (см. табл. 1)	Режим подачи воздуха	A, м	B, м	C, м	$P_{max,D_1}$ ( $P_{max,D_2}$ ), бар	$I_{1 max}$ , бар · с	$I_{2 max}$ , бар · с	$e_s$ , МДж/кг	$V_{1 max}$ , м/с	$V_{2 max}$ , м/с	$E_k max$ , Дж
1	6JV	—	0.7	—	0.61	148 (82)	0.045	0.025	0.64	1.02	1.47	220
2	6JV	2	0.7	0.5↓	0.50	117 (51)	0.033	0.023	0.26	1.25	1.68	290
3	1 : 1	—	0.7	—	0.48	355 (251)	0.043	0.031	0.9	1.1	1.52	236
4	1 : 1	2	0.7	0.5↓	0.54	227 (117)	0.056	0.044	0.97	1.49	2.13	605
5	1 : 1	3	0.7	0.5↓	0.54	107 (123)	0.046	0.037	1.34	1.8	2.44	461
6	1 : 1	3	1.4	0.5↓	0.43	122 (97)	0.029	0.024	0.70	1.34	1.47	222
7	1 : 1	1	0.7	0.5↓	0.52	193 (97)	0.035	0.013	0.98	1.84	2.55	663
8	1.5 : 1	1	0.7	0.5↓	0.52	131 (193)	0.049	0.02	0.92	1.92	2.26	513
9	1.5 : 1	3	0.7	0.5↓	0.52	104 (149)	0.047	0.023	0.84	1.27	1.83	369
10	2 : 1	1	0.7	0.5↓	0.52	142 (123)	0.044	0.021	0.66	1.68	1.97	389
11	2 : 1	3	0.7	0.5↓	0.53	91 (70)	0.040	0.030	0.67	1.22	1.92	341
12	1 : 1	1	0.6	↔	0.55	210 (152)	0.056	0.021	1.02	4.08	3.9	1713
13	1 : 1	1	0.7	0.2↑	0.53	222 (94)	0.05	0.028	1.14	2.05	2.59	680
14	6JV	—	1.4	—	0.34	286 (80)	0.06	0.012	0.68	0.52	1.00	102
15	1 : 1	дет. шнур*	0.7	—	0.52	221 (185)	0.057	0.03	1.21	1.34	1.91	385
16	Гексоген	—	0.7	—	0.52	304 (293)	0.054	0.028	1.1	1.2	1.59	264

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, ↑ — генератор пузырьков расположен над зарядом.

\* Вместо пузырькового канала использована каверна, созданная взрывом детонационного шнура.

табл. 2). В эксперименте наблюдалось значительное уменьшение амплитуды ГУВ по сравнению со взрывом в сплошной воде. Импульс давления, регистрируемый датчиком  $D_2$ , значительно уменьшается, что указывает на эффект поглощения энергии ГУВ пузырьковой средой. Максимальная амплитуда на датчике  $D_2$  составляет 51 бар против 68 бар, что было зарегистрировано в опыте без пузырьков. Датчик  $D_1$  также показывает некоторое снижение амплитуды (117 бар против 148 бар). Снижение объясняется прохождением ГУВ сквозь 20 см слоя пузырьковой среды. Энергия ГУВ резко уменьшается с 0.64 до 0.26 МДж/кг. Гидродинамические волны, прошедшие через пузырьковую колонну, имеют большую длительность, чем в случае сплошной воды.

При взрыве зарядов в воде с пузырьковой колонной практически невозможно определить момент времени, когда давление достигает своего максимума, поскольку сигнал представляет собой череду периодических импульсов. При наличии пузырькового канала относительно гладкий сигнал спада после фронта ударной волны состоит из ряда коротких импульсов. При сглаживании такого сигнала его форма становится похожа на кривую спада в сплошной воде. Природа таких

импульсов, очевидно, связана с многократными отражениями ударной волны в области, где присутствуют пузырьки. Кроме того, возможная неравномерность средней плотности пузырьковой колонны также может быть причиной возникновения импульсов давления. Данные о движении импульсомера демонстрируют увеличение максимальной набранной кинетической энергии и величины полного перемещения за время действия волн сжатия в случае наличия пузырьковой колонны, что свидетельствует об эффекте направленности действия взрыва. Характер набора скорости также двухстадийный, как и в случае сплошной воды. При этом время набора скорости стало более растянутым в соответствии с увеличенной длительностью волн сжатия. Поэтому набор скорости импульсомером во второй стадии разгона ниже и составляет 35% (против 44% в случае сплошной воды).

#### Взрыв зарядов, богатых алюминием

Сначала был проведен взрыв заряда базовой смеси 1 : 1 в сплошной воде, который сравнивался с взрывом аммонита в тех же условиях. Затем базовый заряд с составом 1 : 1 был взорван при наличии пузырьковой колонны и сравнивался с

аналогичным взрывом заряда аммонита в пузырьковом канале (режим 2, табл. 5).

### ***Взрыв неидеального заряда в сплошной воде***

Амплитуда ГУВ в опыте, в котором был взорван заряд из состава 1 : 1 (опыт № 3), увеличилась почти в два раза по сравнению с амплитудой, измеренной в опыте с аммонитом (355 бар против 148 бар). Это связано с увеличением теплоты взрыва заряда из состава 1 : 1. Энергия ударной волны также увеличилась с 0.64 до 0.9 МДж/кг, что ожидаемо, так как при взрыве дореагирует избыточный алюминий. На записи сигнала датчика давления  $D_2$  после спада давления за ведущей волной появились острые импульсы с амплитудой до 80 бар, предположительно связанные с реакцией алюминия с водой после некоторой задержки, обусловленной предварительным смешиванием.

Набор скорости импульсомером происходит по-прежнему в две стадии, однако интенсивность набора скорости выросла, а относительный набор скорости на второй стадии разгона несколько ниже. Полное перемещение импульсомера незначительно превышает перемещение при взрыве аммонита. Максимальная кинетическая энергия также выросла. В целом, опыт демонстрирует незначительные различия в механическом действии неидеального заряда. Усиление некоторых параметров связано с дореагированием избыточного алюминия в полости, образованной расширяющимися продуктами взрыва.

### ***Взрывы неидеальных зарядов в воде с пузырьковым каналом***

Опыт с составом 1 : 1 проведен в воде с пузырьковым каналом (режим № 2). Записи давления демонстрируют увеличение длительности импульса ГУВ по сравнению со всеми вышеупомянутыми экспериментами. Энергия ударной волны много увеличилась по сравнению со взрывом того же заряда в сплошной воде. Давление на фронте ударной волны ниже, чем при неидеальном взрыве в сплошной воде, но почти в два раза выше, чем при взрыве аммонита в воде с пузырьками. На профилях давления за волной присутствуют множественные импульсы, предположительно связанные с неравномерным дореагированием избыточного алюминия с водой. Как показано в работе [7], определяющее влияние на дореагирование избыточного алюминия за ударной волной в облаке расширяющихся продуктов имеет скорость подмешивания воды в продукты, содержащие готовый к реакции алюминий. Процесс смешивания значительно усиливается в присутствии пузырьковой колонны за счет более глубокого проникновения струй продуктов с алюминием в среду с низкоплотными включениями. Кроме того, сжа-

тие газовых включений увеличивает температуру жидкости и, следовательно, скорость окисления алюминия.

Сформированные при детонации струи испытывают многократные воздействия отраженных волн и дробятся в гетерогенной среде, за счет чего поверхность реакции увеличивается. Как результат, мы видим интенсификацию реакции за ударной волной и повышение импульса ударной волны в сравнении с 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. Разгон импульсомера происходит гораздо быстрее по сравнению как с неидеальным взрывом в сплошной воде, так и со взрывом аммонита в воде с пузырьками. Обе стадии набора скорости присутствуют, однако набор скорости происходит равномернее, чем в реперном опыте с аммонитом. Относительный набор скорости на втором этапе больше, чем в реперном опыте, вероятно, за счет большей энергии расширения пузыря. Максимальное значение кинетической энергии также больше в 1.5 раза.

Следует сделать некоторые промежуточные выводы:

- наличие пузырей в воде вокруг заряда интенсифицирует дореагирование избыточного алюминия с водой;
- направленная пузырьковая колонна способствует перераспределению энергии взрыва вдоль нее, т.е. появляется эффект направленности взрыва.

## **ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ПАРАМЕТРЫ ВОЛНЫ СЖАТИЯ**

### ***Влияние длины пузырькового канала***

Повышенные параметры гидровзрывной волны (ГВВ), полученные в опытах со взрывом алюминизированных зарядов в пузырьковых каналах, поднимают вопрос об оптимальном расположении препятствия относительно заряда. Для ответа на этот вопрос были проведены сравнительные эксперименты, в которых заряд с составом 1 : 1, взорванный в условиях пузырькового канала (режим 3), располагался на различной глубине (0.75 и 1.45 м от поверхности импульсомера). Режим 3 генератора пузырей (большой расход и, соответственно, крупные пузыри) был выбран после неудачных попыток создать длинный пузырьковый канал в режимах 1 и 2. При низком расходе канал в верхней части становится нестабильным, так как на траектории пузырьков значительно влияют течения в емкости. Наблюдения за поведением крупных пузырьков в длинной колонне показали, что радиальное рассеяние пузырьковой колонны не превышало 10% от начального диаметра. Эксперимент № 5 (табл. 5) демонстрирует наибольшую

кинетическую энергию импульсомера и небольшое увеличение остальных параметров. Время реакции избыточного алюминия внутри более длинной пузырьковой колонны (опыт № 6) может быть выше, чем время, ограниченное временем разгрузки ГУВ в опыте № 5, а следовательно, максимальный механический эффект воздействия взрыва на препятствие также может быть выше из-за более длительного воздействия. Из табл. 5 видно, что параметры ГВВ и импульсомера намного ниже, чем в эксперименте с более короткой пузырьковой колонной (опыт № 5), за исключением сигнала давления на датчике  $D_1$ , который был расположен ближе к заряду. Таким образом, становится ясно, что оптимальное взаиморасположение элементов установки соответствует опыту № 5, поэтому дальнейшие сравнительные эксперименты проводились в подобной геометрии. Для сравнения влияния глубины расположения заряда был также проведен контрольный опыт с аммонитом, заряд которого также располагался на глубине 1.4 м под импульсомером. Если сравнивать этот опыт с опытом № 1, видно, что в случае более глубокого расположения заряда давления в ГУВ остаются сопоставимыми (принимая во внимание что датчик  $D_1$  был ближе к заряду), однако параметры движения импульсомера ожидаемо более низкие, так как ГУВ потеряла энергию на более дальнем расстоянии от заряда.

#### *Влияние свойств пузырьковой колонны*

Для изучения влияния на параметры ГВВ свойств пузырьковой колонны в дополнение к имеющимся и рассмотренным выше опытам № 3–5 (см. табл. 5) был проведен опыт в той же постановке, но с подачей воздуха в режиме 1. Кроме того, для выяснения влияния объемного содержания пузырьков в воде использовались опыты, в которых содержание избыточного алюминия в заряде было увеличено. Это опыты № 8 и № 9 со смесью 1.5 : 1 с режимами подачи воздуха 1 и 3 и опыты № 10 и № 11 со смесью 2 : 1. Таким образом, для зарядов на основе смесей 1 : 1, 1.5 : 1 и 2 : 1 имеется ряд опытов для сравнения между собой различных режимов подачи газа. Сравнение опытов со смесью 1 : 1 (опыты №№ 4, 5, 7) показало, что при наличии пузырьковой колонны максимальная энергия наблюдается в случае пузырьков среднего размера (1.34 МДж/кг для опыта № 5). Это означает, что размер пузырьков и средняя плотность пузырьковой колонны имеют некоторые оптимальные значения, при которых, с одной стороны, поглощение ударной волны невелико, а с другой — степень подмешивания воды в зону реакции с избыточным алюминием оптимальны для реакции. Следует отметить, что максимальная кинетическая энергия импульсомера

наблюдалась при пузырьках самых маленьких размеров. Это означает, что теплота взрыва лучше трансформируется в механическое действие взрыва в массиве маленьких пузырьков. При сравнении опытов, в которых заряд имел больший избыток алюминия (№№ 8, 9 для смеси 1.5 : 1 и №№ 10, 11 для смеси 2 : 1), также более высокие параметры кинетической энергии импульсомера были в случае канала из мелких пузырей. Та же картина была и для опытов со смесью 1 : 1 (опыт № 7). В этом случае при режиме подачи 2 (опыт № 4) импульс был максимальным. Поведение импульса на нижнем датчике можно объяснить более высоким поглощением энергии в случае режима 3, при котором объемное содержание пузырей воздуха в воде выше.

Также был проведен опыт № 15, в котором вместо пузырьковой колонны между зарядом и препятствием был предварительно взорван отрезок детонационного шнура, создавший каверну из продуктов детонации (фактически — сплошной канал). В подобной постановке эффект направленного взрыва практически отсутствует. При сопоставимых давлениях параметры движения импульсомера наиболее низкие в сравнении с опытами №№ 4, 5, 7.

#### *Влияние состава смеси*

Для изучения влияния избытка алюминия в смеси рассмотрим две группы экспериментов. В первой группе (опыты №№ 7, 8, 10) неидеальные заряды были взорваны внутри пузырькового канала с наименьшей объемной долей воздуха (режим 1). Во второй группе (№№ 5, 9, 11) те же заряды были взорваны внутри пузырьковой колонны с максимальным расходом воздуха (режим 3). В каждой группе по три состава с различным содержанием алюминия (1 : 1, 1.5 : 1 и 2 : 1).

Параметры взрывных волн не демонстрируют монотонных зависимостей по мере обогащения смесей. Так, импульс волны сжатия на нижнем датчике (датчик  $D_1$ ) максимальный в случае заряда 1.5 : 1, а наибольшее давление, на уровне 193 бар, наблюдается в опыте с составом 1 : 1. Из анализа движения импульсомера следует, что увеличение содержания алюминия влечет за собой монотонное уменьшение всех параметров. Кинетическая энергия импульсомера также уменьшается.

#### *Влияние местоположения генератора пузырьков*

Во всех предыдущих экспериментах генератор пузырьков был установлен на полметра ниже заряда. Подобное расположение было выбрано из соображения, что гетерогенная среда вокруг заряда будет способствовать смешению с продуктами детонации, содержащими готовый к вступлению в реакцию алюминий, что усилит реакцию. Однако,

учитывая, что начальный вектор массовой скорости продуктов взрыва ориентирован преимущественно вверх, поскольку заряды инициировались снизу, следует ожидать, что наличие гетерогенной среды под зарядом может вызвать нежелательную разгрузку и, следовательно, снизить интенсивность направленной волны сжатия вдоль гетерогенного канала. Поэтому были проведены эксперименты (опыты № 12 и № 13 в табл. 5), в которых генератор пузырьков располагался на уровне заряда и над ним на высоте 20 см в обоих случаях. Как и ожидалось, присутствие несжимаемой воды под зарядом в опыте № 12 увеличило ускорение ГВВ. Отсутствие разгрузки при инициировании заряда снизу и непрерывная связь продуктов детонации с гетерогенной средой, являющейся поставщиком воды в зону реакции, обеспечили самые максимальные параметры движения импульсомера по сравнению со всеми остальными экспериментами. Стадийность при наборе скорости импульсомером практически отсутствует. Это означает, что первичная ГВВ была поддержана реакцией металла с водой. В случае же, когда между пузырьковым каналом и зарядом присутствует слой сплошной воды (опыт № 13), параметры движения импульсомера более низкие, чем в опыте № 12, хотя и превышают в пределах погрешности полученные в опыте, где пузырьковый канал начинался на полметра глубже заряда.

## ВЫВОДЫ

Сразу следует сделать замечание, что полученные выводы о механическом действии волн сжатия на препятствие относятся только к начальной стадии взрыва, ограниченной временным окном в 10 мс, в котором проводилась регистрация движения подвижного препятствия — импульсомера. Полная картина может быть получена после проведения крупномасштабных экспериментов с большими зарядами в неограниченных водоемах. Сравнение экспериментальных результатов, полученных при взрывах алюминизированных зарядов в сплошной воде, с результатами, полученными от идеальных взрывов, показывает значительный вклад дореагирования избыточного алюминия, особенно на первой стадии взрыва. Эти реакции увеличивают как амплитуду ГВВ, так и удельную энергию ударной волны почти в два раза.

Проведенные сравнительные эксперименты показали, что амплитуда ГВВ, генерируемая идеальными зарядами, значительно уменьшается в опытах, где волна распространяется в пузырьковой среде. Никакого усиленного механического воздействия не наблюдалось, и процесс полностью соответствовал общеизвестному факту подавления ударных волн пузырьковыми завесами.

При взрыве неидеального заряда в окружении колонны пузырьков эффект в целом существенно

выше, не только чем при взрыве идеального ВВ, но и при взрыве неидеального заряда в сплошной воде. Взрыв заряда в гетерогенной среде предположительно приводит к существенному увеличению подмешивания воды в зону реакции избыточного алюминия. Анализ стадий движения импульсомера показывает наличие направленного механического действия взрыва. При этом для перераспределения энергии взрыва с целью достижения наибольшего направленного механического действия необходимо учитывать следующие факторы:

— Затухание ГВВ в пузырьковой среде должно быть сведено к минимуму при сохранении такой неоднородности среды, которая обеспечит интенсивное подмешивание воды в зону реакции алюминия. Оптимальный пузырьковый канал будет в режиме подачи воздуха между режимами 1 и 2 (ближе к последнему).

— Увеличение сжимаемости пузырьковой колонны за счет большего расхода воздуха в рассекателе, с одной стороны, приводит к более равномерному нагружению преграды, а с другой стороны, может привести к поглощению волны сжатия и снижению полноты реакции из-за неоптимального подмешивания воды в зону реакции.

— Для данной постановки эксперимента (где площадь поверхности импульсомера для измерения механического действия взрыва ниже, чем поперечный размер реагирующего пузыря) разгрузка волн сжатия вдоль стенок импульсомера при большом удельном содержании воздуха в воде может быть причиной потерь давления при его ускорении. Этот эффект может снижать полученные характеристики механического действия взрыва.

— “Поджатие” колонны с мелкими пузырями с небольшой объемной концентрацией в воде обгоняющими боковыми волнами, распространяющимися по сплошной воде, может приводить к усилению механического действия на преграду за счет снижения потерь давления внутри колонны на боковую разгрузку.

Проведенные эксперименты, в которых сравнивались составы с различным отношением Al/O, показали, что для зарядов небольшой массы увеличение содержания алюминия не дает никаких преимуществ. Оптимальной по параметрам волн сжатия была смесь 1 : 1. Однако наблюдаемые поздние механические эффекты, не зафиксированные импульсомером в пределах достоверного измерительного временного интервала, позволяют надеяться, что увеличение содержания алюминия может принести некоторую пользу в случае, когда взрывы больших зарядов проводятся в неограниченных объемах воды при более глубоком погружении заряда.

Положение гетерогенной колонны относительно заряда также было рассмотрено в сравнительных опытах, в которых колонна начиналась

на 0.5 м ниже уровня заряда и на одном с ним уровне. Наилучшие результаты были получены в опыте, когда пузырьковая колонна начиналась непосредственно у заряда. В этом случае действуют следующие факторы:

– Отсутствует разгрузка в направлении, противоположном направлению начальных векторов массовой скорости продуктов. Более высокие давления на начальной стадии расширения, вероятно, усиливают смещение с водой и, следовательно, реакцию избыточного металла.

– Все стадии взрыва непрерывно взаимодействуют.

Подводя итог, можно заключить, что реакция избыточного алюминия заметно усиливает механический эффект взрыва, а пузырьковый канал между зарядом и препятствием усиливает воздействие в заданном направлении и в определенной степени позволяет контролировать энергию взрыва.

Авторы признательны за неоценимую помощь идейному вдохновителю этой работы – Анатолию Александровичу Борисову. Благодаря идеям и энциклопедическим знаниям Анатолия Александровича были начаты работы по изучению неидеального подводного взрыва в гетерогенной среде, которые привели к появлению представленной работы.

Авторы также выражают благодарность инженеру-исследователю А.В. Савченко за помощь в проведении экспериментов.

Работа в области экспериментального исследования направленного воздействия подводного взрыва в пузырьковой колонне поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 16-29-01077). Авторы также выражают благодарность Федеральному агентству по научным организациям России (проект 0082-2018-0002, регистрационный код АААА-А18-118031490034-6) за финансовую поддержку той эксперименталь-

ной части, где исследовались детонационные характеристики сверхбогатых алюминием составов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zhu F., Chou C.C., Yang K.H.* // *Composites: Part B*. 2011. V. 42. № 5. P 1202.
2. *Галкин В.В., Гильманов Р.А., Дроговейко И.З.* // *Взрывные работы под водой*. М.: Недра, 1987.
3. *Тимофеев Е.И., Гельфанд Б.Е., Гумеров А.Г. и др.* // *Физика горения и взрыва*. 1985. № 3. С. 98.
4. *Гельфанд Б.Е., Губанов А.В., Тимофеев Е.И.* // *ЖПМТФ*. 1982. Т. 131. № 1. С. 118.
5. *Комиссаров П.В., Соколов Г.Н., Ермолаев Б.С., Борисов А.А.* // *Физ.-хим. кинетика в газовой динамике*. 2011. Т. 12. № 5.
6. *Komissarov P.V., Borisov A.A., Sokolov G.N., Lavrov V.V.* // *Phys. Procedia*. 2015. V. 72. P. 333.
7. *Борисов А.А., Комиссаров П.В., Маилков А.Е., Ельшин Р.Н., Силакова М.А.* // *Хим. физика*. 2002. Т. 21. № 10. С. 92.
8. *Komissarov P.V., Silakova M.A., Borisov A.A. et al.* *ISTC Report*. Project KR#899. 2005.
9. *Комиссаров П.В., Соколов Г.Н., Лавров В.В., Савченко А.В.* // *Матер. VIII Всерос. конф. “Энергетические конденсированные системы”*. Черноголовка: ИПХФ, 2016. С. 245.
10. *Комиссаров П.В., Соколов Г.Н., Лавров В.В., Савченко А.В.* // *Горение и взрыв*. 2017. Т. 10. № 3. С. 114.
11. *Кедринский В.К.* // *ЖПМТФ*. 1968. № 4. С. 29.
12. *Кутателадзе С.С., Стырикович М.А.* // *Гидродинамика газожидкостных систем*, Изд. 2-е. М.: Энергия, 1976.
13. *Городецкая А.В.* // *ЖФХ*. 1949. Т. XXIII. № 1. С. 71.
14. *Hagfors M., Saavalainen J.* // *Proc. 36th Annual Conf. on Explosives and Blasting Technique*. V. 1. Orlando: International society of explosives engineers, 2010. P. 191.
15. *Bjarnholt G.* // *Prop. and Expl.* 1980. № 5. P. 67.
16. *Stromsoe E., Eriksen S.W.* // *Prop., Expl., Pyrotechnics*. 1990. V. 15. P. 52.