

УДК 541.126.662.21

## **СМЕСЕВЫЕ СОСТАВЫ ДЛЯ ПОДВОДНЫХ ВЗРЫВОВ С УСИЛЕННЫМ ДЕЙСТВИЕМ ЗА СЧЕТ ВКЛЮЧЕНИЯ ВОДЫ КАК ВНЕШНЕГО ОКИСЛИТЕЛЯ И ИХ ВЗРЫВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

**Комиссаров П.В., Соколов Г.Н., Ермолаев Б.С., Борисов А.А.**

*Институт химической физики РАН им. Н.Н. Семенова, Москва*

[borisov@chph.ras.ru](mailto:borisov@chph.ras.ru)

### **Аннотация**

В статье представлены результаты экспериментального исследования инициирования и распространения неидеальной детонации в смесях алюминия, перхлората аммония и нитрометана, сильно переобогащенных алюминием. Смеси были заключены в стальные оболочки при взрывах на воздухе и в малопрочные пластиковые оболочки при взрывах под водой. Определены составы, оптимальные для подводных взрывов. Экспериментально исследован механизм смешения продуктов взрыва с окружающей водой и их реагирования. Продемонстрирована высокая полнота сгорания частиц алюминия в воде, а также высокая эффективность подводных взрывов таких зарядов в генерировании импульсов давления с амплитудой до нескольких килобар и большой длительности. Характеристики и форма генерируемых импульсов давления могут регулироваться в широких пределах изменением режима реагирования заряда и введением в воду около заряда пузырьков воздуха. Численным расчетом показано, что взрывы смесевых зарядов в несколько раз более эффективны в разрушении льда, чем заряды тротила.

### **COMPOSITE EXPLOSIVES FOR UNDERWATER EXPLOSIONS ENHANCED BY INCLUSION OF WATER AS AN EXTERNAL OXIDIZER AND THEIR PERFORMANCE**

The paper presents the results of experimental investigations of initiation and propagation of nonideal detonation in mixtures aluminum-ammonium perchlorate-nitromethane highly enriched with aluminum. Mixtures were enclosed in steel tubes when exploded in air and in weak plastic casings when exploded under water. The mechanism of mixing of expanding explosion products with surrounding water and their reaction is studied experimentally. High burnt fraction of aluminum particles in water and high efficiency of underwater explosions of such charges in generating pressure pulses few kilobars in amplitude and long duration are demonstrated. The characteristics and shape of pressure pulses generated can be varied in a wide range by changing the charge burning regime and introducing air bubbles nearby the charge. Numerical simulations have demonstrated that underwater explosions of such charges destroy ice cover several times more efficiently than do explosions of TNT charges.

### **Введение**

Одним из наиболее перспективных путей повышения энергетики взрывчатых систем правомерно считается включение в реакцию окислителя, содержащегося в среде, в которой производится взрыв. Для взрывов в воздухе эффективность такого подхода продемонстрирована на примере так называемых топливо-воздушных взрывчатых систем (FAE) [1, 2, 3]. Однако, вариант с созданием облака топливо-воздушной смеси и ее последующей детонацией, часто применяемый на практике, при подводных взрывах не

может рассматриваться как перспективный, по многим причинам, во-первых, скорость смешения расширяющихся продуктов первичного взрыва с водой очень мала для того, чтобы создать слой смеси водяной пар – разбрасываемый материал, способный реагировать с водой, сколь-нибудь существенных размеров, во-вторых, наиболее перспективными компонентами продуктов первичного взрыва могут быть только частицы металлов, реакция которых с водой идет с выделением тепла, а они требуют высокой начальной температуры для инициирования реакции со скоростями, необходимыми для генерации импульсов давления высокой амплитуды, что сильно ограничивает время, отведенное на смешение, поскольку окружающая среда сильно поглощает тепло. Таким образом, использовать тепло, выделяющееся в реакции металлических частиц, которые содержатся в расширяющихся продуктах первичного взрыва, с водой можно только на стадии, когда температура продуктов, смешанных с парами воды, еще достаточно высока для воспламенения частиц металла с задержками, меньшими, чем время гидродинамической разгрузки объема, в котором протекает реакция. А это означает, что начальная поверхность смешения должна быть несколько порядков величины больше, чем гладкая поверхность границы газового пузыря, образующегося при взрывах нормально детонирующих зарядов. В противном случае частицы просто не успеют прореагировать с водой.

Естественно, повышение общей энергетике взрыва за счет реакции частиц алюминия с окружающей водой приведет к уменьшению начальной амплитуды волны, поскольку заряд должен содержать избыточный металл, и к ее увеличению на более поздних стадиях, т.е. взрывная волна становится «мягче» и растягивается во времени, это важно для многих практических применений, например, для разрушения льда, сейсморазведки, компактирования порошковых и штамповки листовых материалов. В настоящей работе решались две задачи: (i) выяснялась возможность инициирования и распространения детонации в зарядах, содержащих большое количество алюминиевых частиц, в прочных и малопрочных оболочках и (ii) определялись характеристики импульсов давления, генерируемых взрывом заряда в воде, и выяснялся механизм их формирования.

### **Инициирование и распространение неидеальной детонации в смесях алюминий - перхлорат аммония - нитрометан**

Реализация дополнительной энергии взрыва за счет реакции компонентов продуктов с окружающей водой накладывает очень жесткие требования на взрывчатые системы и заряды из них. Во-первых, заряды должны содержать большое количество частиц металла (например, алюминия) для получения заметного эффекта и при этом или детонировать или быстро сгорать, создавая высокое давление (в килобарном диапазоне), разогревая частицы металла до температур, которые достаточны для их воспламенения после смешения продуктов с необходимым для сгорания частиц количеством воды с задержками, меньшими, чем время газодинамической разгрузки образующегося облака гетерогенной смеси. Во-вторых, взрыв заряда должен произойти так, чтобы продукты с самого начала разлетались в виде глубоко проникающих в воду струй, резко увеличивающих поверхность смешения. Для этого давление взрыва должно быть высоким, но не настолько, чтобы сразу сформировать практически ламинарное течение расширяющихся продуктов вследствие дробления оболочки на очень мелкие осколки. Распространение волны реакции по заряду в пульсирующем режиме, характерном для неидеальной детонации, и разрыв оболочки заряда на достаточно крупные фрагменты могут обеспечить необходимые скорость и объем слоя смешения. Наиболее подходящими для этих целей можно считать смеси твердого окислителя, например перхлорат аммония

(АП), алюминия и жидкого компонента, например, нитрометана, который обеспечивает низкую пористость пастообразных зарядов при сохранении приемлемой их детонационной способности.

Распространение и инициирование детонации и быстрого конвективного горения в таких трехкомпонентных смесях с избытком алюминия практически не исследовано. Поэтому проведено экспериментальное исследование на образцах лабораторного масштаба с целью показать, какие режимы детонации можно ожидать в таких системах, и обеспечить хотя бы минимальный набор данных для проведения теоретического анализа механизма распространения детонационных волн и оценки их параметров.

### **Измерения параметров неидеальной детонации тройных смесей в прочных и малопрочных оболочках.**

Термин неидеальная детонация относится к детонационным волнам, в которых тепло выделяется не полностью до плоскости Чепмена-Жуге и реакция продолжается в волне разрежения за этой плоскостью. Как отмечалось выше, неидеальная детонация богатого алюминием смесевго заряда – наиболее выгодный для генерации импульсов давления режим. При этом для практического применения заряд должен быть плотным, что может быть легко достигнуто введением жидкого или пластического компонента. В проведенных ниже экспериментах основным таким компонентом был нитрометан. Целью исследований было получить ответы на следующие вопросы:

- при каком максимальном количестве металла в смеси она останется детонационно-способной;
- при какой пористости (плотности) заряда, и в каком его окружении (прочная стальная или водная оболочка) детонация может быть возбуждена и распространяться стационарно;
- каковы скорости детонации при различном содержании компонентов и насколько они отличаются от идеальных значений Чепмена-Жуге (т.е. насколько полно реагирует смесь непосредственно за фронтом детонации и сколько ее остается для реакции в расширяющихся продуктах детонации).

Для этого необходимо было:

- разработать методику измерения скорости детонации в смесях, детонирующих с низкими скоростями в прочных и малопрочных оболочках;
- разработать способ инициирования смесей источниками энергии, генерирующими волны давления с параметрами (давление и длительность волны), как можно более близкими к тем, которые ожидаются в детонационных волнах исследуемых смесей.

Последнее необходимо по двум причинам. Во-первых, при слишком высокой энергии инициатора трудно убедиться в том, что волна детонации в испытуемом заряде вышла на стационарный режим в пределах его ограниченной длины, во-вторых, для надежного измерения скорости необходимо, чтобы волна детонации с самого начала заряда распространялась в неидеальном режиме (чтобы реакция продолжалась в расширяющихся продуктах и поддерживала высокую температуру металлических частиц), что может быть достигнуто при «мягком», долго действующем иницирующем импульсе.

В литературе не удалось найти никаких данных о детонационной способности предлагаемых тройных смесей. Чтобы убедиться в том, что они действительно детонационно-способны и в каких пределах концентраций компонентов, в данной работе мы ограничились только измерениями скорости детонации. Кроме того, осколки оболочки также анализировались, поскольку по их размеру можно было судить о длине струй продуктов в воде, т.е. о толщине слоя смешения. Для измерения скорости процесса детонации была выбрана опто-волоконная методика. Поскольку основной целью исследования была обработка детонирующих зарядов, содержащих как можно больше алюминия для его реагирования с окружающей водой, при проведении опытов на воздухе необходимо было найти способ обработки сигналов от фотодиодов, который позволил бы отличить паразитные сигналы от ярко светящихся разлетающихся продуктов, регистрируемые через оторванные взрывом волокна от предыдущих отверстий в оболочке, от сигналов меньшей яркости, регистрирующих прибытие волны на последующие отверстия. Опыты на воздухе проводились в стальных трубах длиной 40 см и внутренним диаметром 10 и 20 мм. Вдоль трубы просверливалось 8 отверстий диаметром 0,25 мм. Трубы заполнялись смесью в вертикальном положении и затем поворачивались в горизонтальное положение для вклейки оптических волокон. Сразу после вклейки они возвращались в вертикальное положение. Такая процедура позволяла минимизировать попадание частиц в отверстия с оптоволоконном и расслаивание смеси. Опыты проводились с вертикально установленными зарядами. Примеры регистрируемых сигналов приведены на Рис. 1.

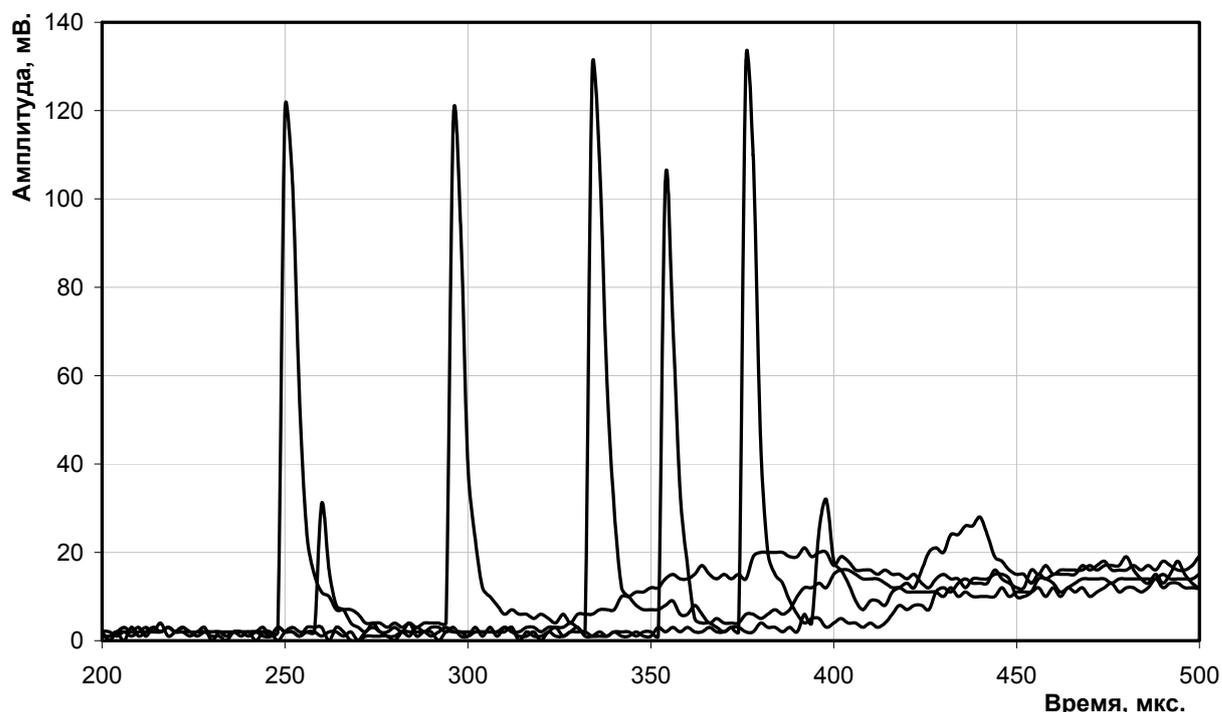


Рис. 1. Наблюдаемые формы сигналов свечения при детонации смесей.

Для определения времени прибытия волны на место помещения оптоволоконна мы выбрали момент перегиба на возрастающей части сигнала (время максимальной скорости роста

интенсивности излучения). Исследования проводились с неоднородными смесями, компоненты которых за фронтом волны начинали реагировать не одновременно. Это приводило к искажению формы регистрируемого сигнала. Появление пика свечения, предшествующего основному, наблюдавшееся в некоторых опытах можно объяснить неоднородностью довольно протяженной зоны реакции, в которой присутствуют как светящиеся объемы, так и не реагирующие (не светящиеся) объемы. Не исключено также и то, что реагирование компонентов в неоднородной смеси может привести к струйному механизму распространения волны. В этом случае применялась та же самая процедура (по основному пику) определения момента прибытия волны. Кроме того, слабое свечение и неоднородность зоны реакции приводили к довольно низкому отношению полезный сигнал/шум в регистрируемом свечении, поэтому для выделения полезных сигналов пришлось применить процедуру сглаживания сигнала, которая, как видно из Рис. 2, оказалась весьма эффективной.

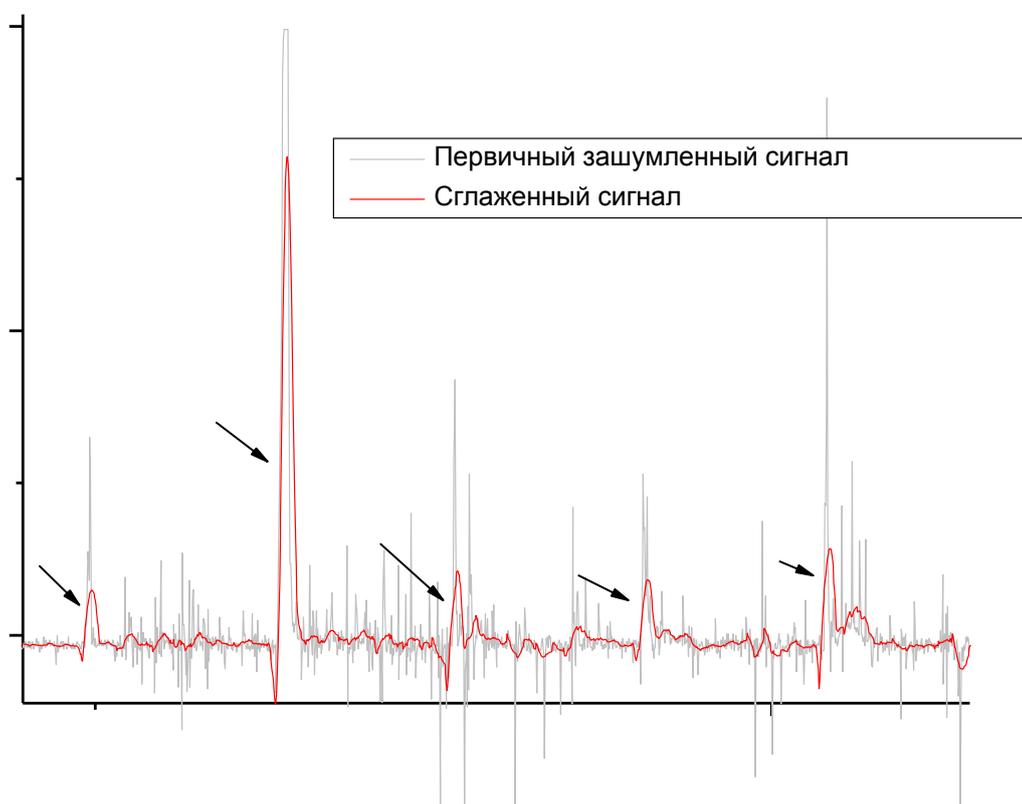


Рис. 2. Пример сглаживания регистрируемого сигнала.

Небольшие размеры заряда в лабораторных исследованиях и широкие зоны реакции в детонационных волнах накладывают специальные ограничения на инициатор: он не должен генерировать сильно пересжатую детонацию на начальной стадии, но импульс должен быть длительным, чтобы тыльная волна разрежения не повлияла на ход реакции в инициированной волне до стадии, характерной для стационарной неидеальной детонационной волны (т.е. до плоскости Чепмена-Жуге, устанавливающейся в ней). Слабые оболочки, которые неизбежно должны использоваться в практических применениях зарядов, также требуют инициирующего импульса большой длительности.

Поэтому мы разработали инициатор, детонация в котором возбуждается слабым источником через переход горения в детонацию, скорость детонации на уровне 4 – 4,5 км/с, а плотность продуктов и длина зоны реакции в детонационной волне близки к характерным для детонационных волн в исследуемых смесях. Заряд стехиометрической смеси алюминия (частицы ПАП-2) и перхлората аммония (частицы размером около 40 мкм), плотность и пористость которой регулировалась добавками керосина, заключенный в стальную трубку внутренним диаметром 10 мм был выбран в качестве инициатора.

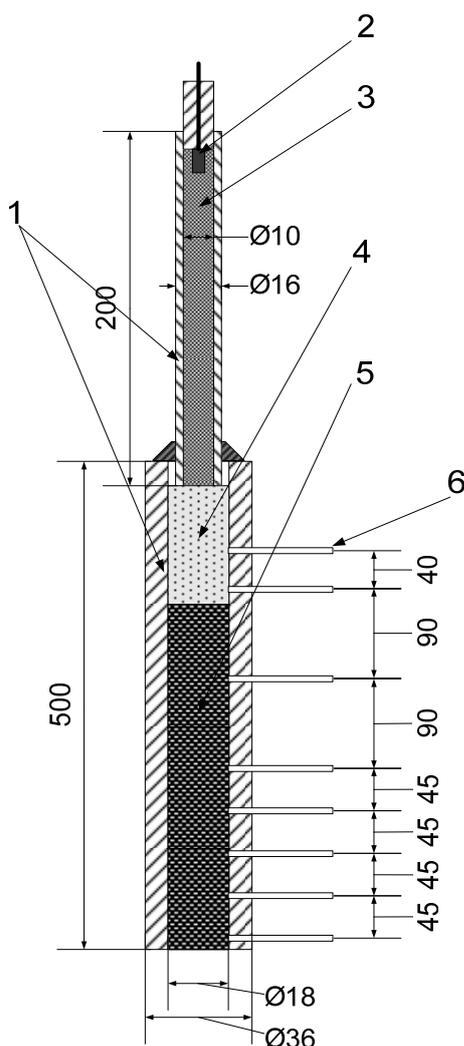


Рис. 3. Заряд в прочной оболочке с оптоволоконном для измерения скорости процесса взрыва. Инициатор, в котором происходит переход горения в детонацию, расположен в верхней части рисунка. Размеры указаны в миллиметрах. 1 – Стальная трубка, 2 – Воспламенитель, 3 – Стехиометрическая смесь Al/ПХА, 4 – Стехиометрическая смесь Al/ПХА+4,6 % керосина, 5 – Богатая металлом исследуемая смесь, 6 – Оптоволоконна.

На Рис. 3 показана схема заряда в стальной оболочке. Опыты проводились со смесями алюминия (чешуйчатый ПАП-2 со средним размером частиц  $1 \times 10 \times 10$  мкм) и перхлората аммония (со средним размером частиц менее 40 мкм, 80% частиц имеют размер в интервале 30-40 мкм). Просеянный порошок ПА выдерживался в течение двух дней в сушильном шкафу при температуре  $90^{\circ}\text{C}$ . Смесь приготавливалась следующим образом: сначала смешивались сухие компоненты и смесь высыпалась на противень в виде слоя толщиной около 2 мм. Затем на слой равномерно наливался нитрометан и полученный смоченный состав покрывался полиэтиленовой пленкой. Слой, насыщенный в течение получаса нитрометаном, сворачивался в шар и разминался. Полиэтиленовая пленка удалялась непосредственно перед загрузкой смеси в оболочку. Процедура обеспечивала приемлемую равномерность распределения компонентов по заряду и предотвращала испарение нитрометана. Смесь вводилась порционно с контролем плотности каждой порции. Гомогенный заряд с изменением плотности по длине не более 2% получался, когда высота порций была не более диаметра заряда. Проверка показала, что заряд не расслаивался в течение двух дней, а концентрация нитрометана в нем не изменялась независимо от ориентировки заряда.

Изучалось влияние концентрации алюминия и нитрометана на характеристики детонации смеси. Основной целью было определение, при каких концентрациях компонентов смеси можно считать детонационно-способными. На первом этапе опыты проводились с зарядами в стальных трубах длиной до 400 мм и диаметром 20 мм.

Все опыты были разделены на несколько серий. В первой серии опыты проводились со смесями, содержащими 10% нитрометана (здесь и далее весовые проценты), с изменением отношения  $\text{Al}/\text{ПХА}$  в диапазоне  $1/1 - 2.5/1$ . Во второй серии в смесях с отношением  $\text{Al}/\text{ПХА}$ , равным  $1/1$ , изменялось содержание нитрометана от 10 до 40 % (при этом пористость смеси уменьшалась от 40% до 0). В третьей и четвертой сериях содержание нитрометана также увеличивалось от 10 до 40%, но в смесях с отношением  $\text{Al}/\text{ПА}$ , равным  $2/1$  и  $2.5/1$ , соответственно. Результаты опытов показали, что стационарного режима низкоскоростной детонации можно ожидать только для смесей с отношением  $\text{Al}/\text{ПХА}$ , не превышающем  $2/1$ .

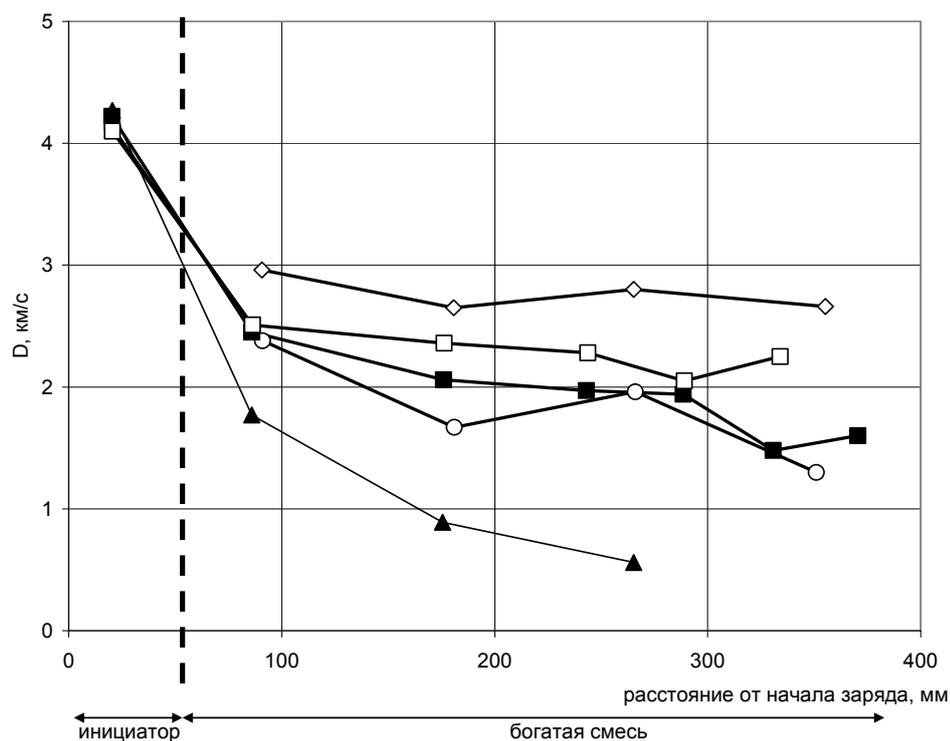


Рис. 4. Скорость детонации в зависимости от расстояния в зарядах с одинаковой концентрацией НМ (10 %) и различным отношением Al/PXA:  $\diamond$  — Al/PXA=1/1,  $\square$  — Al/PXA= 1.5/1,  $\blacktriangle$  — Al/PXA= 2.5/1,  $\blacksquare$  — Al/PXA= 1.8/1,  $\circ$  — Al/PXA= 2/1.

Влияние на процесс избытка алюминия в смеси продемонстрировано на Рис. 4. Вертикальной линией на рисунке обозначена граница смеси в заряде. Как видно, использованный инициатор вполне воспроизводимо возбуждает детонацию в смеси, которая распространяется со скоростями на уровне 4 км/с. Траектории волнового фронта демонстрируют, что только смеси с отношением Al/PXA, равным 1/1 или 1.5/1 способны поддерживать стационарную детонацию в условиях опыта. Детонация в смеси более богатой алюминием затухает. Осколки оболочки при этом имеют любопытную форму: при скоростях волны менее 2 км/с это полоски длиной около 2 диаметров заряда или меньше и шириной от 3 до 8 мм.

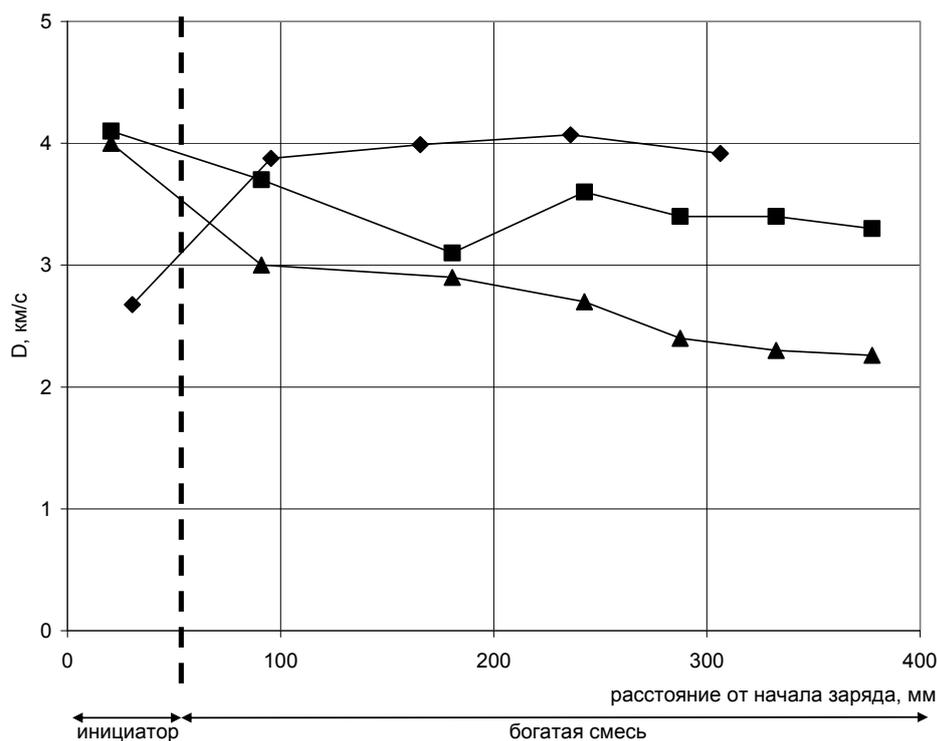


Рис. 5. Скорость детонации в зависимости от расстояния в зарядах с одинаковой концентрацией НМ (23 %) и различным  $Al/PXA$  отношением:  $\blacklozenge$  —  $Al/PXA = 1/1$ ,  $\blacksquare$  —  $Al/PXA = 2/1$ ,  $\blacktriangle$  —  $Al/PXA = 2.5/1$ .

Увеличение концентрации нитрометана до 23% увеличивает скорость детонации (см. Рис. 5) на 0.5 или 1 км/с в сравнении с такой же смесью  $Al/PXA$ , но содержащей 10% нитрометана. Это связано с большей плотностью первой и свидетельствует о ведущей роли нитрометана в распространении и инициировании детонации в смеси. Затухающий режим детонации в смеси с большим содержанием нитрометана наблюдается при большем отношении  $Al/PXA$ . Хотя увеличение концентрации нитрометана в смеси снижает в ней абсолютное содержание алюминия, сравнение графиков на Рис. 4 и 5 показывает безусловное преимущество смесей с большим содержанием НМ с точки зрения генерации импульсов давления при подводном взрыве. Кроме того, с практической точки зрения низкопористые смеси технологически более выгодны, поскольку они плотнее, лучше противостоят внешним воздействиям, более однородны и пластичны и более удобны для загрузки в оболочку.

Для проверки, насколько исследуемые смеси чувствительны к инициатору, были проведены опыты, в которых две наиболее перспективные смеси из второй серии инициировались зарядом дымного пороха. На Рис. 6 видно, что с ростом концентрации алюминия детонация развивается медленнее и затухает на расстоянии, равном приблизительно 15 диаметрам заряда. Следовательно, смеси с отношением  $Al/PXA = 2/1$  близки к концентрационному пределу по избытку инертного материала в условиях наших экспериментов, даже небольшое увеличение содержания алюминия приводит к затуханию низкоскоростной детонации.

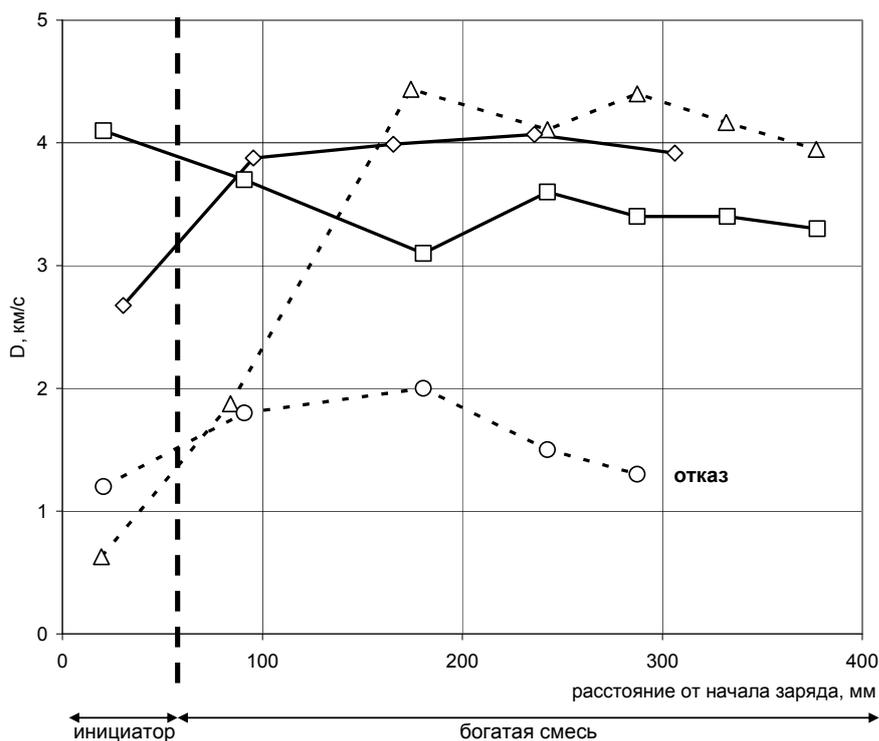


Рис. 6. Сравнение скоростей детонации зарядов одинакового состава ( $\diamond, \Delta$  —  $Al/PXA=1/1 + 23\% \text{ NM}$  и  $\square, \circ$  —  $Al/PXA=2/1 + 23\% \text{ NM}$ ), инициированных различными источниками энергии:  $\square, \diamond$  - переход горения в детонацию в трубке диаметром 10 мм, заполненной стехиометрической  $Al/PXA$  смесью, и  $\Delta, \circ$  - заряд дымного пороха весом 2 г.

Во второй серии опытов при постоянном отношении  $Al/PXA = 1/1$  содержание нитрометана увеличивалось до 40% (до нулевой пористости). Результаты опытов показаны на Рис. 7, 8 и 9. Детонационные волны в смесях с большим содержанием  $NM$  распространяются более стабильно и с большими скоростями, наблюдаемые небольшие колебания скорости, которые, по-видимому, связаны с неоднородностью смеси. Более высокая детонационная способность смесей с повышенным содержанием  $NM$  делает их более перспективными для применения в малопрочных оболочках, несмотря на несколько меньшее содержание в них алюминия.

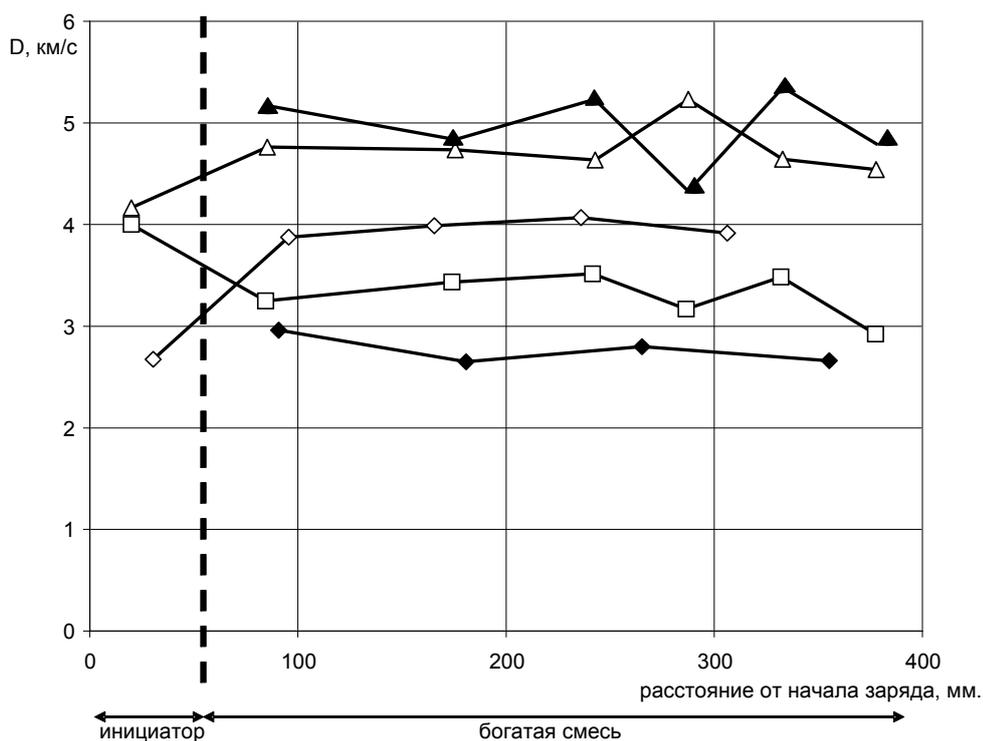


Рис. 7. Влияние содержания НМ в смеси 1/1 Al/ПХА на скорость детонации:  $\blacklozenge$  — 10% НМ (1.23),  $\square$  — 17% НМ (1.46),  $\Delta$  — 30% НМ (1.66),  $\diamond$  — 23% НМ (1.48),  $\blacktriangle$  — 40% НМ (1.75). В скобках указана плотность смеси в  $\text{г/см}^3$ .

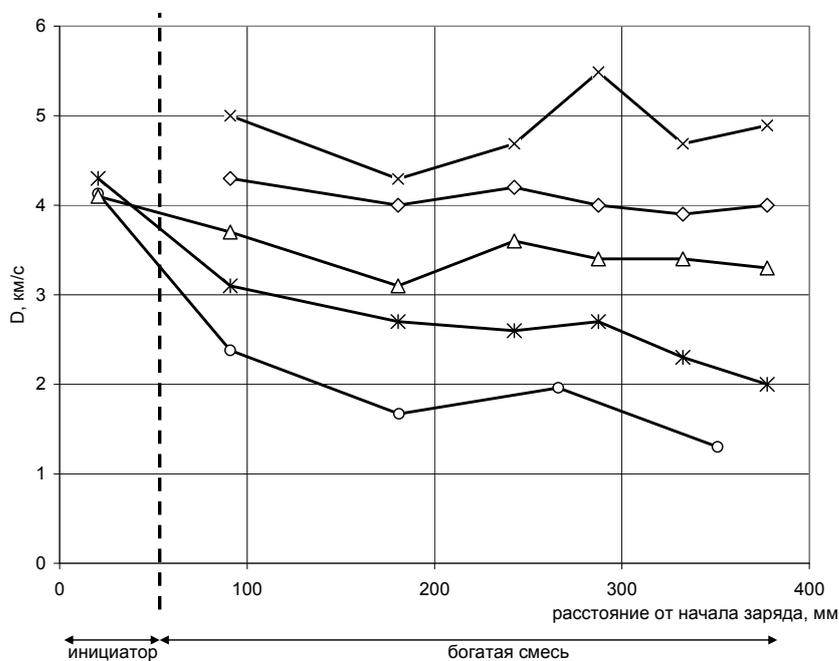


Рис. 8. Влияние содержания НМ в смеси Al/ПХА=2/1 на скорость детонации:  $\times$  — 40% НМ (1.89),  $\diamond$  — 30% НМ (1.69),  $\Delta$  — 23% НМ (1.54),  $*$  — 17% НМ (1.35),  $\circ$  — 10% НМ (1.35). В скобках

указана плотность смеси в  $\text{г/см}^3$ .

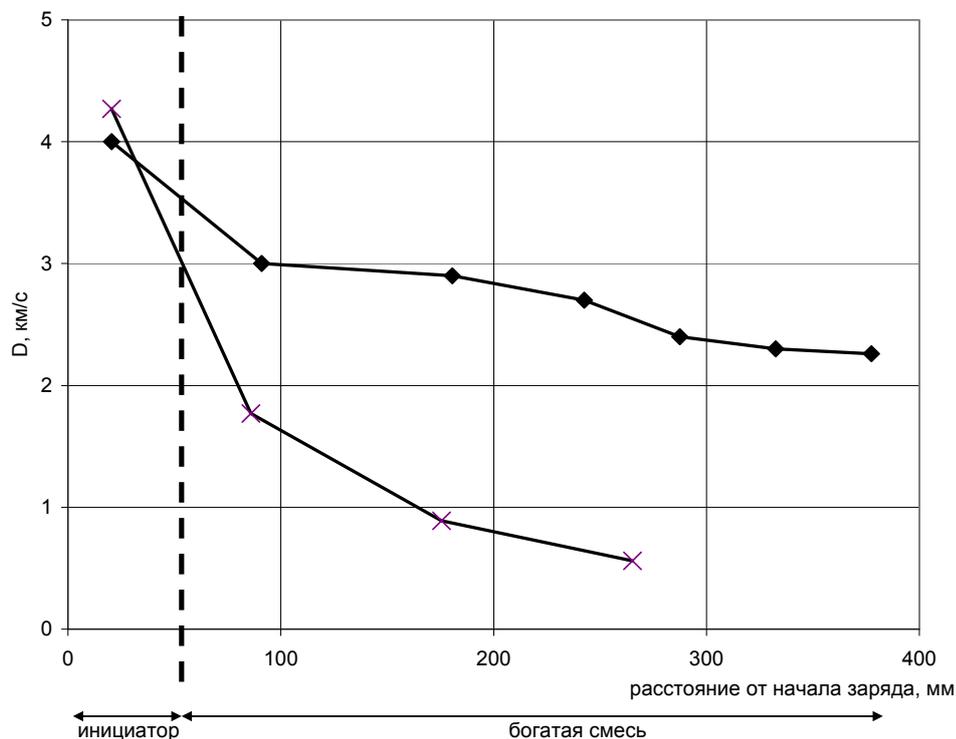


Рис. 9. Влияние содержания НМ в смеси  $\text{Al/ПХА} = 2.5/1$  на скорость волны:  $\times$  — 10 % НМ (плотность –  $1.13 \text{ г/см}^3$ ),  $\blacklozenge$  — 23 % НМ (плотность –  $1.62 \text{ г/см}^3$ ).

Как видно из Рис. 8, самоподдерживающаяся низкоскоростная детонация распространяется и в смеси с 2:1  $\text{Al/ПХА}$  при увеличении содержания НМ до 23%. Скорости детонации в такой смеси ниже, чем при отношении  $\text{Al/ПХА}$ , равном 1/1, но она более интересна для применения при взрывах под водой, поскольку содержит 51,3 вес.% алюминия, и, следовательно, потенциально более энергетична (за счет возможной реакции металла с окружающей водой).

Увеличение содержания металла в смеси до отношения  $\text{Al/ПХА} = 2.5/1$  привело к затухающим режимам детонации (Рис. 9). Возможно, в более длинных зарядах и в зарядах с большим содержанием НМ детонация могла бы выйти на стационарный режим, однако, возникли технические трудности с обеспечением однородности более «жидких» зарядов, поскольку НМ вытекал из вертикально установленных зарядов, а попытки подпрессовать их закончились тем, что поверхность заряда покрывалась жидким НМ. Загущение НМ, очевидно, могло бы решить эту проблему, однако это требует дополнительных исследований влияния загустителя на детонационную способность смеси, которые в этой работе не проводились.

Для того, чтобы подтвердить гипотезу о ведущей роли нитрометана в зоне реакции детонационной волны, был проведен опыт со смесью  $\text{Al/ПХА} = 1/1$ , в которой НМ был заменен керосином. Как видно из сравнения результатов опытов для смесей с НМ и керосином на Рис. 10, смесь с керосином не детонационно-способна в отличие от смеси с НМ.

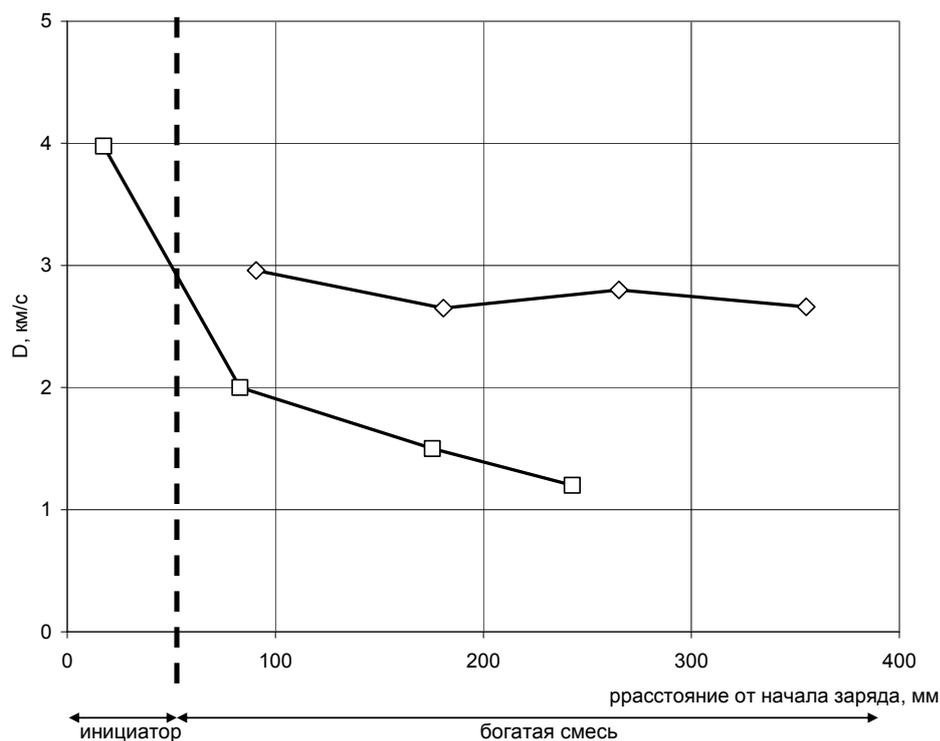


Рис. 10. Сравнение скорости волновых процессов в смесях, содержащих НМ или керосин: при одинаковом отношении  $Al/PXA = 1/1$  и при одинаковом весовом содержании жидких компонентов:  $\diamond$  —  $Al/PXA = 1/1 + 10\%$  НМ,  $\square$   $Al/PXA = 1/1 + 10\%$  керосина.

Следует отметить, что все исследованные режимы детонации приводили к разрушению оболочек заряда на крупные осколки, это дает надежду на то, что заряды в прочных оболочках могут обеспечить объем зоны смешения, достаточный для получения заметного эффекта от реакции металла с водой на генерируемый импульс давления. Что касается взрывов зарядов в малопрочных оболочках, окруженных водой, как показывает опыт, детонация в таких оболочках обычно распространяется в пульсирующем режиме, так что размер струй и объем зоны смешения в этом случае контролируются размером пульсаций.

Все предыдущие опыты проводились в толстостенных стальных оболочках, которые неприемлемы для практического применения зарядов. При подводных взрывах вода, за счет достаточно большой ее массы, может играть роль прочной оболочки и поэтому можно надеяться, что вышеописанные заряды могут детонировать под водой в слабых пластиковых оболочках.

Как показано в [4], смеси с  $Al/PXA = 1/1$  и  $2/1$ , содержащие 17, 23 и 30 вес.% НМ, плотностью  $1.45-1.55 \text{ г/см}^3$  действительно детонируют в низкоскоростном режиме (неидеальная детонация) в полиэтиленовых оболочках внутренним диаметром 21 мм с толщиной стенок 2.5 мм, окруженных 30-см слоем воды.

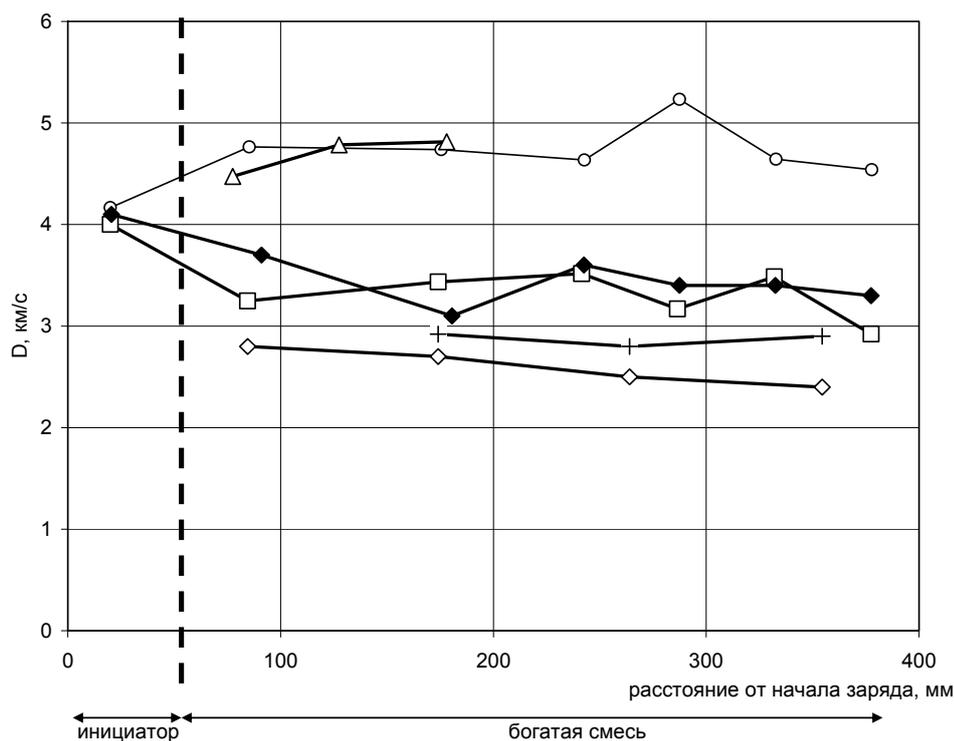


Рис. 11. Сравнение скоростей детонации в смесях с одинаковым содержанием компонентов, измеренных в зарядах в прочных стальных (на воздухе) и пластиковых (в воде) оболочках: □ —  $Al/PXA = 1/1 + 17\% \text{ NM}$ , ○ —  $Al/PXA = 1/1 + 30\% \text{ NM}$ , △ —  $Al/PXA = 1/1 + 30\% \text{ NM}$  (в воде), + —  $Al/PXA = 1/1 + 17\% \text{ NM}$  (в воде), ◆ —  $Al/PXA = 2/1 + 23\% \text{ NM}$ , ◇ —  $Al/PXA = 2/1 + 23\% \text{ NM}$  (в воде).

Как видно из Рис. 11, испытанные смеси остаются детонационно-способными и в слабых оболочках при взрывах под водой, хотя скорости детонации несколько ниже, чем в стальных оболочках на воздухе. Особенно это заметно для смесей с малым содержанием NM и высоким содержанием алюминия.

Таким образом, эта часть исследования приводит к следующему заключению.

Возбуждение и распространение самоподдерживающихся низкоскоростных режимов детонации в смесях перхлорат аммония – алюминий с добавками нитрометана, при взрывах которых под водой избыточный металл может реагировать с окружающей водой, повышая общую энергетику заряда, вполне реальны. Важным для практики является тот факт, что детонируют смеси с низкой пористостью, содержащие до 55 вес.% алюминия. Из совокупности экспериментальных данных следует, что ведущую роль в зоне реакции детонационных волн играет нитрометан. Определен диапазон смесей, детонационная способность и плотность которых и содержание алюминия в них достаточно высоки, чтобы считать их перспективными для генерации импульсов давления высокой амплитуды и длительности при подводных взрывах. В этот диапазон входят смеси с соотношением  $Al/PXA = 1/1$  и концентрацией нитрометана 17 – 23% и  $Al/PXA = 2/1$  с содержанием нитрометана 23-30%. Данные смеси детонируют со скоростями около 3 км/с и выше не только в прочных стальных оболочках, но, что особенно важно, в пластиковых оболочках диаметром 21 мм, будучи погруженными в воду. Смесей с

высоким содержанием нитрометана детонируют с большими скоростями (до 5 км/с), но могут также представлять практический интерес, несмотря на то, что они содержат меньше алюминия, поскольку, во-первых, они более плотные, генерируют более высокий первичный импульс в воде, их легче инициировать, и температура избыточного алюминия в продуктах их детонации выше (это важно для развития их реакции с окружающей водой). По-видимому, их целесообразно использовать при высоких гидростатических давлениях, в частности для компенсации противодействия при разлете продуктов реакции и предотвращения усадки зарядов в непрочных или негерметизированных зарядах. Как показали опыты с инициаторами различной интенсивности, вследствие невысокого содержания перхлората аммония, испытанные заряды не склонны к быстрому переходу горения в детонацию, т.е. вполне безопасны в обращении.

### **Механизм взаимодействия расширяющихся продуктов неидеальной детонации с окружающей водой и характеристики генерируемых импульсов давления.**

Задачей следующего этапа исследования было выяснение того, насколько реально повысить энергетику подводного взрыва зарядов, обсуждавшихся выше, за счет реакции избыточного алюминия с окружающей водой и каковы характеристики генерируемых импульсов давления. В связи с высокой скоростью звука в воде рассчитывать на высокую амплитуду ведущей ударной волны не приходится, она будет определяться параметрами Чепмена-Жуге детонирующей смеси, поскольку возможное выделение энергии за счет реакции частиц алюминия с окружающей водой происходит на более поздней стадии и фактически должно существенно изменить динамику расширения пузыря продуктов детонации, представляющего в этом случае не чисто газовое облако, а гетерофазную смесь. Т.е. измениться должно соотношение между импульсом первичной волны, генерируемой в сплошной воде детонацией заряда (короткой длительности, вследствие того, что «поршневое» действие продуктов детонации, перегруженных конденсированной фазой, на воду не велико из-за их низкой скорости) и вторичными импульсами давления, генерируемыми расширяющимися и реагирующими продуктами детонации.

Опыты проводились с зарядами смеси 1:1 или 1:2 перхлорат аммония (ПА)/алюминий с различными добавками нитрометана в полиэтиленовых оболочках внутренним диаметром 21 мм с толщиной стенки 2.5 мм. Средний размер частиц ПА был 35 мкм, алюминий был чешуйчатый марки ПАП-2. Плотность заряда зависела от концентрации нитрометана и алюминия и изменялась в диапазоне 1.45 – 1.66 г/см<sup>3</sup>. Схема заряда представлена на Рис. 12, основная смесь и инициатор (стехиометрическая смесь ПА-алюминий плотностью 1.5 г/см<sup>3</sup>, заключенная в стальную оболочку внутренним диаметром 10 мм) помещались в полиэтиленовую оболочку, которая герметически закрывалась с обоих концов. Процесс конвективного горения в инициирующей секции быстро переходил в детонацию, что гарантировало надежное инициирование детонации основной смеси в заряде, помещаемом в воду.

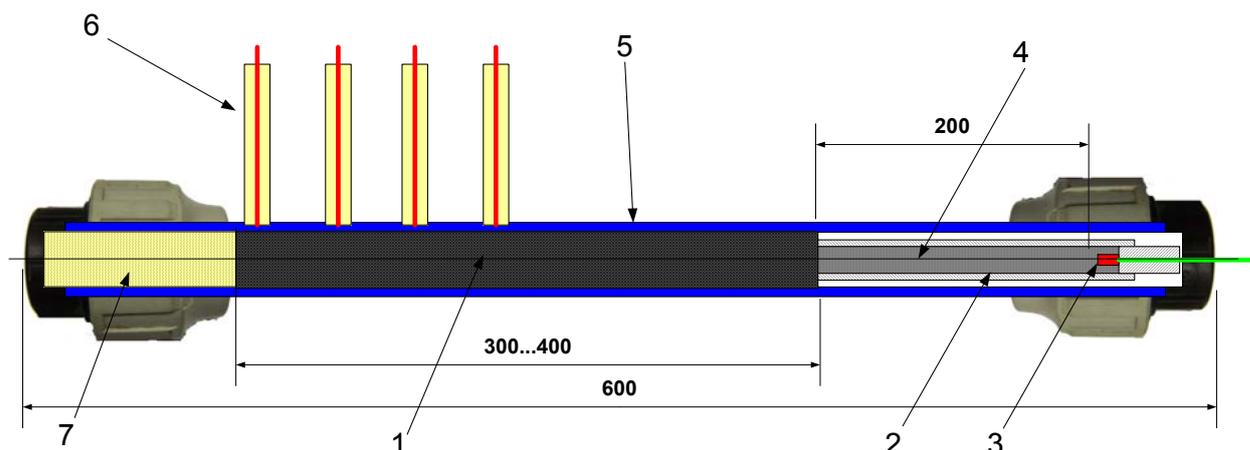


Рис. 12. Схема заряда в полиэтиленовой оболочке с инициатором, действующим на основе перехода горения в детонацию: 1- исследуемая смесь, 2- стальная трубка внутренним диаметром 10 мм, 3- воспламенитель, 4- иницирующая смесь алюминия (ПАП-2) + ПХА (диаметр частиц 35 мкм) в количестве 13 г, 5- полиэтиленовая оболочка внутренним диаметром 21 мм, 6- волоконные световоды для измерения скорости детонации, 7- песок.

Вблизи торца, противоположного инициатору, засыпался песок для сохранения газопроницаемости и сжимаемости заряда и предотвращения сильных эффектов, связанных с отражением волн от торца заряда.

Прежде всего, необходимо было установить, как происходит расширение продуктов детонации цилиндрических зарядов, которые наиболее целесообразно применять во многих практических ситуациях. Свечение расширяющихся реагирующих продуктов неидеальной детонации достаточно для регистрации формы облака двухфазной среды с помощью высокоскоростной видео съемки. Эксперименты проведены в полиэтиленовых мешках, заполненных водой. Диаметр резервуара составлял не менее 60 см, что обеспечивало массу воды, присоединенную к боковой стенке оболочки заряда, эквивалентную 3 мм стальной оболочки. Заряд устанавливался вертикально по оси резервуара, так что он был окружен слоем воды 30-см толщины. Для предотвращения разрушения волнами, распространяющимися в воде, световоды заключались в пенополиуретановые оболочки с закрытой пористостью. Процесс фотографировался видео камерой со скоростью 10000 кадров в секунду.

Как и следовало ожидать, скорость детонации смесей существенно ниже скорости детонации Чепмена-Жуге, рассчитанной с помощью термодинамического кода. Это свидетельствует о том, что компоненты смеси продолжают реагировать между собой в процессе расширения продуктов детонации, т.е. выделение полной запасенной химической энергии завершается более медленно как в самих продуктах детонации, так и при их смешении с окружающей водой.

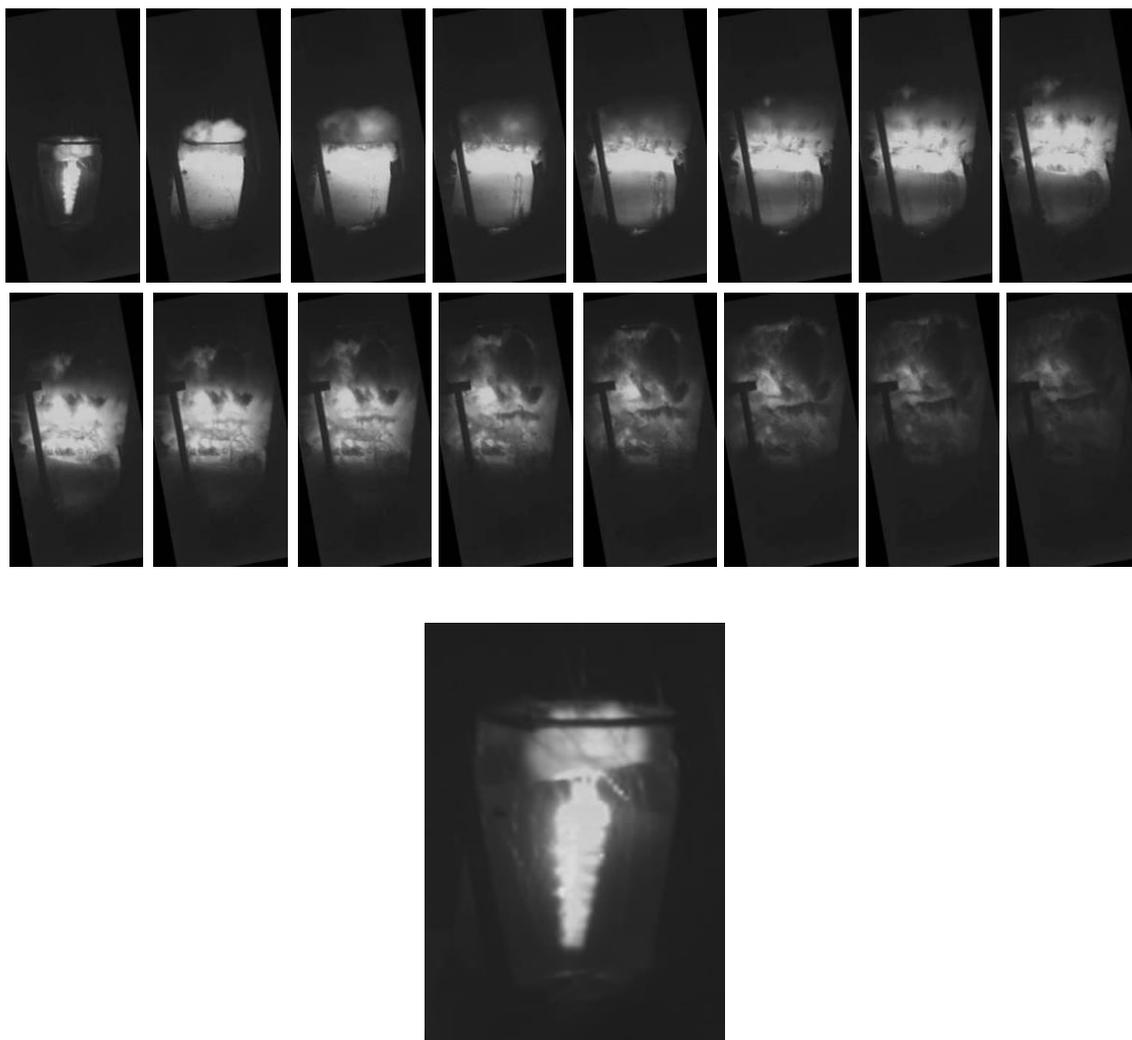


Рис. 13. Кадры развития реагирующего облака гетерогенной смеси продукты детонации – вода при детонации заряда, снятые с частотой 10000 кадров/с. Первый кадр также представлен в увеличенном виде.

Видеокадры, представленные на Рис. 13, демонстрируют развитие облака реагирующих продуктов детонации в воде. Детонирующая смесь была 1:1 ПА:А1 + 30% НМ, скорость детонации 4.8 км/с. Первый кадр, увеличенная копия которого приведена также на этом рисунке, соответствует моменту прихода детонационной волны на торец заряда. Как следует из этого кадра, детонация распространяется в пульсирующем режиме, поскольку чисто гидродинамическая неустойчивость границы раздела не может обеспечить струй наблюдаемых размера и периодичности. Пульсирующий режим распространения типичен для неидеальной детонации (средняя скорость которой ниже скорости Чепмена-Жуге) в слабых оболочках и безоболочечных зарядах и наблюдался как в конденсированных, так и газовых зарядах [5, 6, 7]. Образование глубоко проникающих струй резко интенсифицирует процесс смешения воды с продуктами и вовлечение сгорания частиц алюминия в водяном паре в общий энергетический баланс при взрыве. В верхней части кадров свечение связано с разлетом продуктов детонации инициатора в воздух, оно быстро затухает. В верхнем слое воды свечение также очень интенсивно и держится существенно дольше, при этом светящееся облако поднимается

выше начального уровня воды. Здесь интенсивность смешения и реакции продуктов и паров воды существенно усилена разлетом воды из поверхностного слоя, сопровождающимся уменьшением плотности облака. О разлете воды свидетельствуют кадры, начиная с третьего, на которых видны сильные искажения поверхности воды, которые быстро растут со временем, а также повторное увеличение интенсивности свечения над поверхностью воды. И только, начиная с 6-7 кадра (т.е. 500-600 мкс после завершения детонации заряда), интенсивная реакция начинает развиваться в глубине водного столба. Длительность этой реакции около 500 мкс. Таким образом, приведенные кадры дают представление о временных масштабах энерговыделения: первичная ударная волна от детонирующего заряда достигает края водяного столба через 200 мкс, а интенсивная реакция сгорания частиц алюминия в воде начинается уже после того, как волна разрежения с периферии столба воды достигла его оси, т.е. в процессе разлета воды. Это согласуется с опытами, выполненными в трубах [8, 9].

Интересно отметить, что боковая граница водяного столба практически не меняет своего положения до тех пор, пока светящееся реагирующее облако не охватывает всего его объема. Это связано с малой сжимаемостью сплошной воды и ее резким возрастанием в облаке гетерогенной взвеси, поскольку волны давления в сплошной воде приводят к очень малым перемещениям жидкости. Следует также подчеркнуть, что скорость звука в гетерогенном облаке очень низка, поэтому выход наружу изменений давления, возникающих за счет реакции внутри него, затруднен, т.е. волны давления как бы «заперты» в гетерогенном облаке.

Косвенным указанием на то, что энергия заряда, включая выделившуюся в реакции избыточного алюминия с водой, реализуется достаточно полно, можно считать результат воздействия взрыва на железобетонную плиту, на которой стоял резервуар с водой. Плита разрушена с образованием почти полусферической воронки диаметром 70-80 см, крупные осколки плиты вдавлены в песок, на котором она лежала. Такое разрушение вызвано долговременным воздействием импульса давления, которое с учетом относительно малого диаметра резервуара и радиальной разгрузки ударной волны, можно объяснить только движением гетерогенного газо-водяного облака, которое при остановке потока на твердой поверхности приводит к многократному повышению давления [10].

Таким образом, можно ожидать, что увеличение облака водно-газовой взвеси приведет к существенному увеличению импульса давления не в первичной ударной волне, а значительно позднее за счет реакции избыточного алюминия с водой и дореагирования продуктов неидеальной детонации. Мощные вторичные импульсы давления наблюдались в опытах в трубе в [8, 9]. Подчеркнем, что подводные взрывы неидеально детонирующих зарядов со значительным избытком алюминия генерируют более «мягкие» (растянутые во времени) импульсы давления (по сравнению со взрывами обычных ВВ), которые более предпочтительны для некоторых технических применений в связи с меньшими пиковыми давлениями, но с большей работой, которую может выполнить взрываемый заряд. Естественно ожидать, что чем больше начальный размер гетерогенного облака (чем легче и глубже проникают струи продуктов детонации в воду на первой стадии), тем меньше будет задержка проявления вторичных реакций в суммарном импульсе давления и тем больше будет эффективность взрыва. Об этом свидетельствует интенсивное развитие во времени светящегося облака вблизи верхней границы столба жидкости.

Один из простых способов интенсификации смешения продуктов детонации с водой – уменьшение плотности жидкости около заряда, например, предварительным барботажем пузырьков газа в воде. Таким способом можно не только регулировать размер начального облака, но и его форму, т.е. направленность импульса давления. При этом первичная ударная волна потеряет амплитуду вследствие значительного увеличения сжимаемости среды, но зато увеличится вторичный импульс.

Для выяснения возможного эффекта предварительного введения пузырьков газа в воду на характер генерируемых импульсов давления был проведен следующий опыт. Заряд длиной 410 мм такого же типа, как описано, выше помещался в бассейн, заполненный водой так, чтобы он был окружен слоем воды не менее 20 см со всех сторон. Инициатор был заменен на 8 граммовый заряд гексогена с капсулем детонатором. Бассейн помещен на пол. Для измерения давления во взрывной волне использовались датчики Т-6000, смонтированные в швеллере шириной 12 мм, вкопанного в песок. Над швеллером помещался бассейн. На мембрану датчика наносился тонкий слой графитовой смазки. Один из датчиков регистрировал давление в сплошной воде, а другой в воде с пузырьками воздуха. Схема бассейна и размещения заряда, датчиков и генератора пузырьков воздуха показана на Рис. 14.

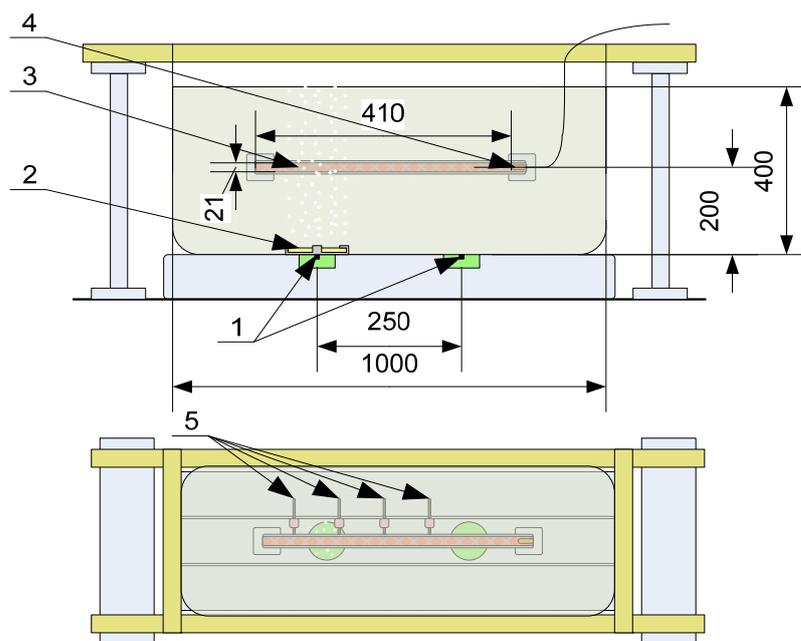


Рис.14. Схема резервуара с размещением датчиков давления, заряда и генератора пузырьков воздуха. 1- пьезоэлектрические датчики давления (левый из них размещен в зоне с пузырьками воздуха), 2- генератор пузырьков воздуха, 3 – заряд в пластиковой оболочке, 4 – инициатор (8 гексогена и капсуль детонатор), 5 – волоконные световоды для измерения скорости детонации в заряде.

Для калибровки датчиков была использована динамическая процедура. Датчики ввинчивались в массивный полый стальной цилиндр весом 1.4 кг, в полость цилиндра помещался легкий поршень, пространство между которым и мембраной датчика заполнялось парафином. Цилиндр с датчиком подвешивался, так что он мог свободно двигаться в горизонтальном направлении. К цилиндру присоединялся калиброванный пьезоэлектрический акселерометр АР-40. При ударе по поршню регистрировались одновременно сигналы от датчика давления и акселерометра. По массе цилиндра с

датчиком и акселерометром и ускорению, зарегистрированному последним, рассчитывалась приложенное усилие и соответственно давление в слое парафина. Параллельная запись сигналов показана на Рис. 15. То, что максимум сигнала от датчика давления наблюдается несколько позднее, связано, по-видимому, большей (по сравнению с металлом) сжимаемостью парафина, усиленной возможным присутствием в нем небольших пузырьков воздуха.

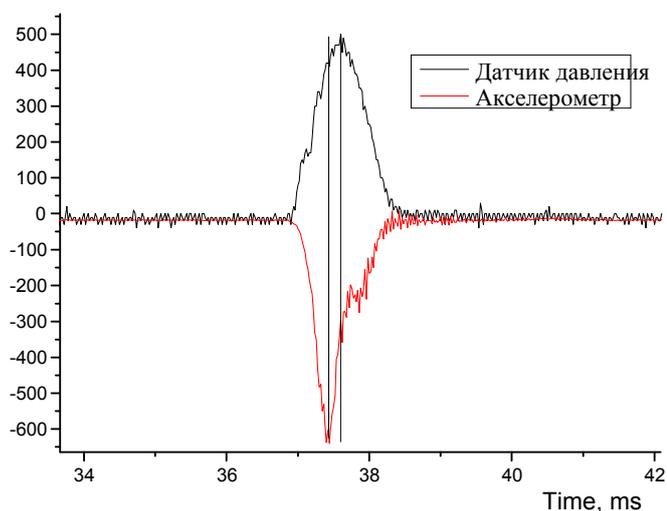
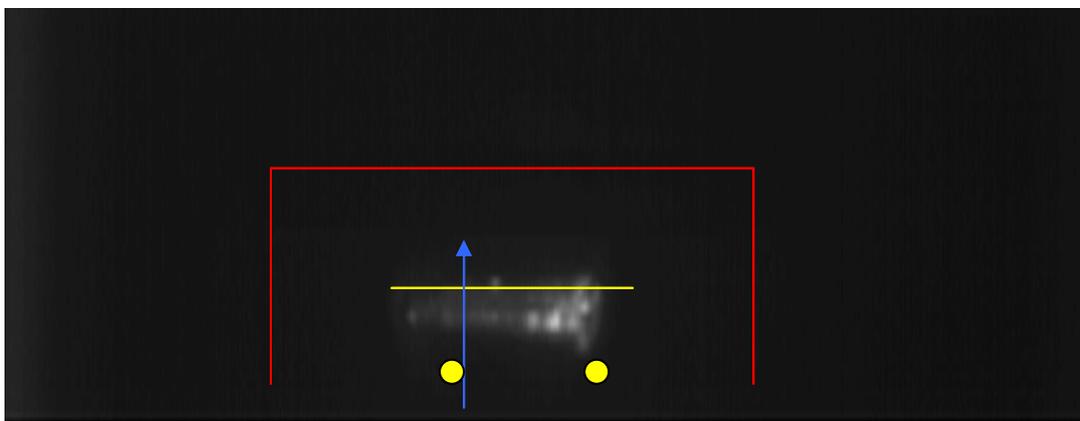
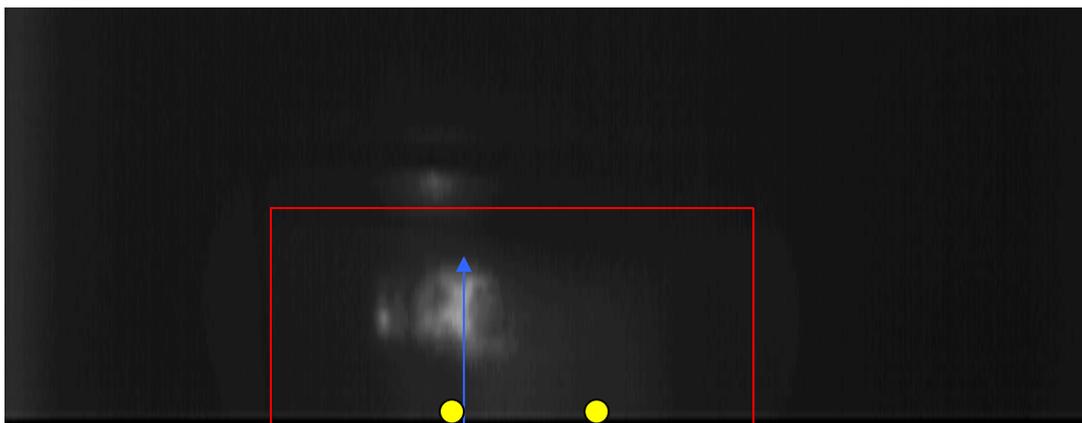


Рис. 15. Сигналы, зарегистрированные от акселерометра и датчика давления в калибровочных опытах. Уровень максимального давления около 200 бар.

Генератор пузырьков воздуха представлял собой пластиковую трубку, туго навитую в виде плоской спирали, в которой иглой проколоты отверстия. Спираль помещалась на дно бассейна вокруг датчика давления. Воздух под давлением 4 атм подавался с обоих концов спирали. Для создания однородной вертикальной колонки не сливающихся небольших пузырьков над спиралью помещался легкий конический «спойлер», а в воду добавлялось небольшое количество поверхностно активного вещества. Плотность жидкости в колонке изменялась между 0.3 и 0.5 г/см<sup>3</sup>.



А



В

Рис. 16. Последовательные кадры видеосъемки (10000 кадров/с) детонации заряда со скоростью 3200 м/с. Горизонтальная линия показывает начальное положение заряда, вертикальная линия – ось столба воды с пузырьками. Круги – положения датчиков давления. Границы бассейна также обозначены линиями.

Процесс также фотографировался скоростной видео камерой со скоростью 10000 кадров/с (время выдержки 10 мкс). На Рис. 16 представлены два последовательных кадра, из которых следует, что картина течения в сплошной воде идентична обсуждавшейся выше, тогда как в жидкости с пузырьками воздуха свечение сразу охватывает весь объем столба, т.е. реакция протекает интенсивно практически везде. К сожалению, полиэтиленовая пленка бассейна была слишком толстой и не позволила получить более четкие кадры.

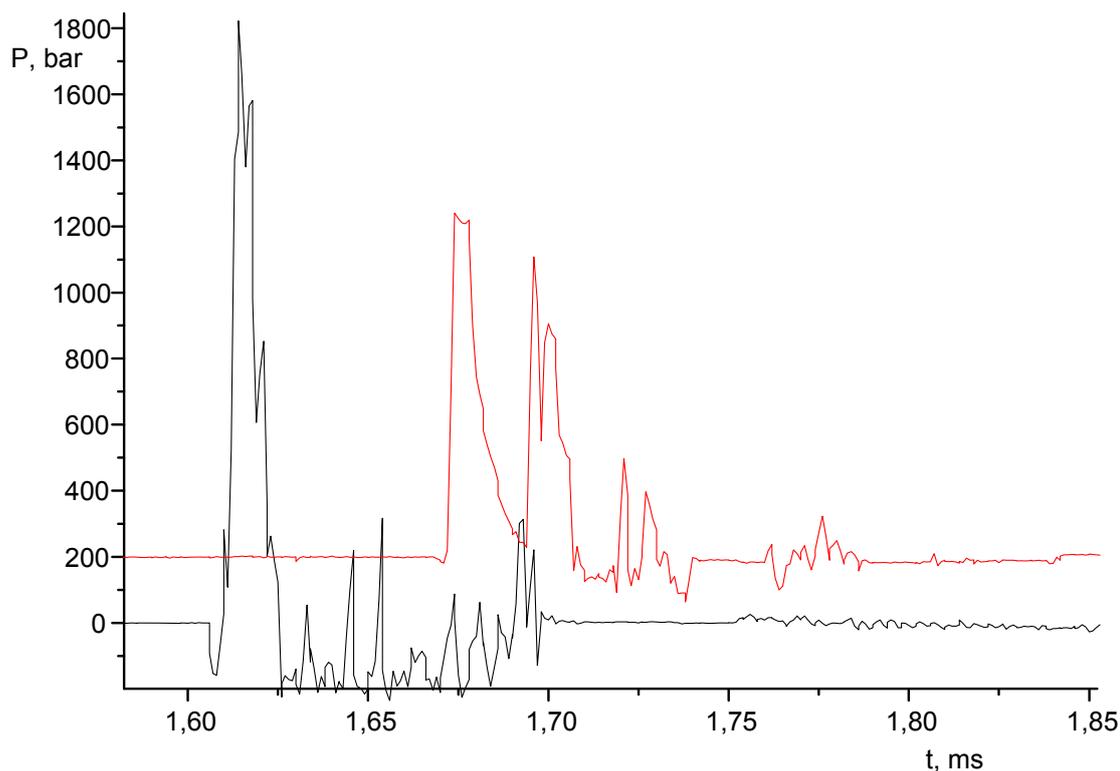


Рис. 17. Оциллограмма давления, зарегистрированная в сплошной воде (нижняя) и в воде с пузырьками воздуха (верхняя).

Оциллограммы давления показаны на Рис. 17. Небольшой отрицательный пик давления на обеих оциллограммах можно объяснить тем, что взрывная волна, отражающаяся от балки, на которой смонтированы датчики, индуцирует волну в самой балке, которая распространяется с большей скоростью, чем скорость распространения ударной волны в воде. Деформация материала балки вызывает движение воды, направленное от поверхности балки, т.е. в конечном счете, к волне разрежения. Амплитуда предшественника, распространяющегося по балке, спадает с расстоянием от точки отражения взрывной волны от балки, поэтому отрицательный импульс наблюдается только вблизи этой точки. Увеличение сжимаемости жидкости естественно должно уменьшить амплитуду отрицательного импульса, что и наблюдается на оциллограмме. Что касается амплитуды зарегистрированных импульсов, то для ударной волны в сплошной воде следует ожидать согласия с соответствующими данными для идеально детонирующих ВВ, с учетом энергетического подобия, поскольку на начальной стадии, т.е. за времена порядка десятков мкс, вклад реакции алюминия с водой должен быть незначителен. Действительно, в соответствии с [11,12] для цилиндрического заряда такого же размера давление отражения в ударной волне должно было бы быть около 3,5 кбар. Однако если учесть, что начальный радиус смесового заряда следует уменьшить на отношение энергетик зарядов смеси и ТНТ, оцененным как отношение квадратов скоростей детонации (т.е. для части энергии, выделившейся до плоскости Чепмена-Жуге) получается ожидаемое значение амплитуды отраженной волны, практически совпадающее с измеренным (1715 бар). Для волны в жидкости с пузырьками воздуха такого сравнения произвести невозможно. Однако ясно, что амплитуда первичной волны

в этом случае должна быть ниже, поскольку амплитуда падающей на преграду волны резко уменьшается.

Как и в опытах, проведенных в трубах [8, 9], в воде с пузырьками воздуха появляется второй импульс давления, который отсутствует в сплошной воде. Из результатов опытов, обсуждавшихся выше, следует, что развитие облака реагирующей двухфазной среды занимает не менее 500 микросекунд, тогда как в сплошной воде это время больше, чем время разгрузки воды в стороны, а если учесть, что около балки с датчиками стенки резервуара не плотно прилегали к поверхности пола, оно оказалось много больше, чем время разгрузки. По-видимому, это основная причина, почему вторичного импульса нет в сплошной воде. В жидкости с пузырьками воздуха резкое уменьшение скорости звука приводит к возрастанию времени разгрузки, а увеличение проницаемости среды для струй продуктов детонации приводит к росту размеров гетерогенного облака и интенсификации смешения. Отраженная от пола ударная волна, распространяющаяся по гетерогенному реагирующему облаку увеличивает скорость сгорания частиц алюминия в водяном паре (за счет увеличения температуры при сжатии) и генерирует вторичную волну давления.

При распределенном во времени выделении энергии взрыва амплитуда волны, генерируемой взрывом, должна упасть, но при этом обязательно возрастает импульс волны, поскольку в этом случае именно он может служить мерой выделившейся энергии. Измерения показали, что импульс волны, зарегистрированный датчиком в воде с пузырьками, по крайней мере, в 1.5 раза больше, чем импульс волны, зарегистрированный датчиком в сплошной воде.

Сами значения импульса волны сравнивать с величинами, рассчитанными по формулам из [11,12] не имеет смысла, поскольку формулы выведены для взрывов в воде практически неограниченного объема. Длительности зарегистрированных импульсов давления оказались существенно короче тех, которые можно было бы ожидать по формулам из [11,12], что, по-видимому, связано не столько с ограниченным размером резервуара, а с неустраняемыми пустотами под дном резервуара вблизи от датчиков давления.

Таким образом, можно считать твердо установленным что:

- смеси перхлорат аммония – алюминий – нитрометан с большим избытком алюминия плотностью 1.5-1.65 г/см<sup>3</sup> способны детонировать под водой в слабых оболочках малого диаметра;
- интенсивная реакция избыточного алюминия с окружающей водой начинается не ранее 0.5 мс после детонации заряда и длится несколько сотен микросекунд, поэтому воздействие давления на преграды в этом случае будет более «плавным», чем при взрыве идеально детонирующего ВВ, с меньшей амплитудой, но большими ожидаемыми импульсом волны и работоспособностью;
- изменение начальных условий взрыва, например, увеличение проницаемости жидкости для струй продуктов детонации введением в нее пузырьков газа, приводит к увеличению размера облака продукты - вода и скорости их смешения и реагирования, увеличивая импульс волны; следует при этом отметить, что такая процедура резко снижает амплитуду отрицательной фазы волны, губительной для ихтиофауны;

Результаты проведенных опытов не раскрывают всех особенностей и преимуществ взрывов рассмотренных зарядов с дополнительным выделением энергии за счет реакции алюминия с окружающей водой, поскольку временные масштабы процессов выделения энергии требуют проведения опытов в бассейнах большего размера. Однако на качественном уровне они четко демонстрируют, что высокая эффективность таких взрывчатых систем при крупномасштабных взрывах вполне реальна.

### **Полнота реагирования частиц алюминия с водой при подводном взрыве**

Полнота выделения энергии, запасенной в заряде – важный фактор, определяющий то, насколько предлагаемые системы энергетически выгоднее, чем обычные ВВ. В связи с этим были проведены специальные опыты. В первой серии проводилось измерение температуры воды после взрыва 10-г заряда в трубе с помощью 200-мкм термопар. Предполагалось, что взрыв интенсивно перемешивает воду, так что она оказывается равномерно нагретой по всему объему за время, в течение которого теплоотвод не сильно влияет на измерения. Это позволило определить количество тепла, поступившего в воду. Обнаружена интересная особенность на записи термопары, помещенной под инжектором: после быстрого роста температуры наступает ее резкий спад, что свидетельствует о поступлении воды в эту зону в результате вихревого ее движения, генерируемого инжектруемой струей продуктов. Затем начинается рост температуры, связанный с выравниванием температуры в слоях интенсивно циркулирующей воды. Рост температуры выводит ее на плато на уровне 30°C. Простой расчет показывает, что в воду выделилось 24.5 ккал теплоты. Это эквивалентно детонации 24 гр ТНТ. Таким образом, коэффициент эффективности, взятый как отношение массы ТНТ, выделяющей то же количество теплоты, что и исследуемый заряд, к массе смеси в инжекторе, равен **2.4**. Расчетное значение теплоты взрыва для использованной смеси с учетом реакции с водой составляет 26.9 ккал. Термодинамический расчет, проведенный как для взрыва ТНТ, так и взрыва исследуемого заряда в воде, дает для теплового тротилового эквивалента значение 2.75, что близко к вышеприведенной оценке.

Проведенный хроматографический анализ газообразных продуктов взрыва также свидетельствует о достаточно высокой степени реагирования алюминиевых частиц. Анализ конденсированных продуктов взрыва показал практическое отсутствие несгоревших частиц алюминия, а среди продуктов окисления алюминия обнаружен в больших количествах бемит.

### **Моделирование воздействия взрыва на плиту льда**

Для оценки возможного воздействия импульсов давления, генерируемых взрывом, на объекты типа ледяной плиты, были проведены эксперименты, в которых измерялись импульс, передаваемый потоком двухфазной среды, создаваемой взрывом в трубе, поршню, помещенному в нее, и работа, совершаемая продуктами. Несмотря на значительные потери, измеренные величины импульса и работы продемонстрировали высокую эффективность рассматриваемых зарядов в воздействии на преграды. К сожалению, мы не имели возможности провести натурные полномасштабные испытания зарядов, поэтому были выполнены сравнительные численные расчеты воздействия взрыва на плиту льда взрывами заряда ТНТ и заряда гетерогенной смеси. Использована специально разработанная программа<sup>1</sup>. Масса сосредоточенного заряда была 10 кг и глубина его погружения 1 м. Расчеты разрушения проводились на основе данных,

<sup>1</sup> Программный код разработан Никуличевым В.Б. (КPCУ, г. Бишкек) на основе модели изложенной в [13].

полученных решением задачи о подводном взрыве зарядов с неподвижной верхней границей. Эти данные охватывают период времени, немного превышающий 10 мс.

Расчеты показали существенную разницу в качественной картине разрушений, производимых волной сжатия от взрывов зарядов ТНТ и смесового. Значительная деформация плит в случае взрыва смесового заряда наблюдается позднее, чем в расчетах для ТНТ, а траектории движения раскрошенной массы имеют иной вид. Картина самого разрушения была просчитана намного дольше десяти миллисекунд, к этому времени полной разгрузки волны сжатия еще не наступило, и волна продвинулась почти на 3 метра от осевой линии. К моменту 12.6 мс началось разрушение первого ряда элементов в круге радиусом 3,2 м. Некоторая задержка объясняется инерциальными свойствами плиты. В то же время деформация плиты продвинулась несколько дальше, чем волна сжатия. Такое поведение плиты объясняется двумя факторами: более высокой, чем в воде скоростью звука во льду (в расчетах была принята скорость звука во льду равная 2.2 км/с), из-за чего возмущение в плите обгоняет разбегающуюся от оси симметрии взрывную волну, распространяющуюся под плитой со скоростью около 300 м/с. Разрушение плиты продолжается до 30 мс, в то время как воздействие волны сжатия прерывается спустя 10 мс после начала взаимодействия. Дело в том, что в течение этих первых 10 мс элементы плиты приобрели достаточную кинетическую энергию, чтобы продолжать двигаться вверх и после снятия нагрузки, и увлекать за собой не подвергнутые нагружению волной сжатия элементы, находящиеся справа от зоны воздействия. В результате из ледяной плиты толщиной 2 метра был полностью выброшен кусок диаметром 8 метров. Магистральные трещины охватили всю плиту диаметром 16 м. Очевидно, что этот расчет не показывает истинной картины разрушений, которую следует ожидать от заряда массой 10 кг, и показывает значительно заниженные результаты, так как область образования майны ненамного превысила область, для которой имелись газодинамические данные. Понятно, что использование газодинамических данных, просчитанных до момента полной разгрузки волны сжатия, а также увеличение расчетного радиуса ледяной плиты значительно увеличило бы как размер майны, так и радиус, внутри которого развились бы магистральные трещины.

Уменьшение толщины льда до 1 м привело к увеличению образовавшейся майны до 10 метров, что подтверждает утверждение об увлечении вместе с подвергшемся воздействию волны сжатия льдом соседних с ним элементов. Действительно, меньшая масса плиты способствует выбросу большего количества обломков.

Сравним полученные результаты о разрушении ледовых плит различной толщины разработанными генераторами импульсов нового типа с зарядами тротила. Расчеты показывают, что при воздействии ударной волны при взрыве тротила качественная картина разрушений сохраняется независимо от массы выбранного заряда. Образующаяся струя выбивает из ледяной плиты круг диаметром до 4 метров и поднимает фонтан обломков и воды сквозь образовавшееся отверстие на высоту до 15 метров. При этом энергия заряда расходуется в основном на сообщение выброшенной массе потенциальной энергии. В практических условиях такое разрушение считается неэффективным и свидетельствует о недостаточной глубине заложения заряда. В случае же с воздействием на лед волны сжатия от генератора импульсов нового типа происходит «мягкое» нагружение плиты в течение несколько раз более длительного времени. Несмотря на то, что, как было сказано выше, проведенные численные эксперименты с генератором импульсов показывают далеко не полное возможное разрушение, площадь образовавшейся майны превосходит почти в семь раз площадь майны от заряда тротила с большей в 10 раз массой. Однако следует сделать оговорку о соответствии такого

результата реальным условиям. Программный комплекс не был верифицирован на больших зарядах, и поэтому результаты не могут быть использованы для количественной оценки диаметра образующейся свободной ото льда майны и радиуса зоны растрескивания. Полученные результаты могут сравниваться только качественно и только между собой, несмотря на то, что численные эксперименты по разрушению льда зарядами тротила находятся в количественном соответствии с эмпирическими данными. В качестве еще одной иллюстрации эффективности воздействия на ледяную плиту волны сжатия, рожденной новым зарядом, на Рис. 18 представлены зависимости эффективной массы разрушенного льда от времени для взрывов зарядов ТНТ и алюминий содержащей смеси. Эта масса определяется следующим образом. В каждый момент времени во всей расчетной области подсчитывается число элементов конечно-разностной сетки, обладающих отличной от нуля кинетической энергией, то есть начавших движение, и умножается на массу элементарной ячейки (это допустимо, так как начальные размеры элементов во всей расчетной области одинаковы). Предполагается, что начавшие двигаться элементы можно считать отделившимися от основной плиты, и, следовательно, масса всех таких элементов будет определять долю разрушенного к определенному моменту льда. Для сравнения между собой зависимости для расчетов действия зарядов различной массы и плит различной толщины выведены совместно. Преимущество нового типа зарядов настолько очевидно, что не требует дополнительных комментариев.

Масса раздробленного льда, тонны

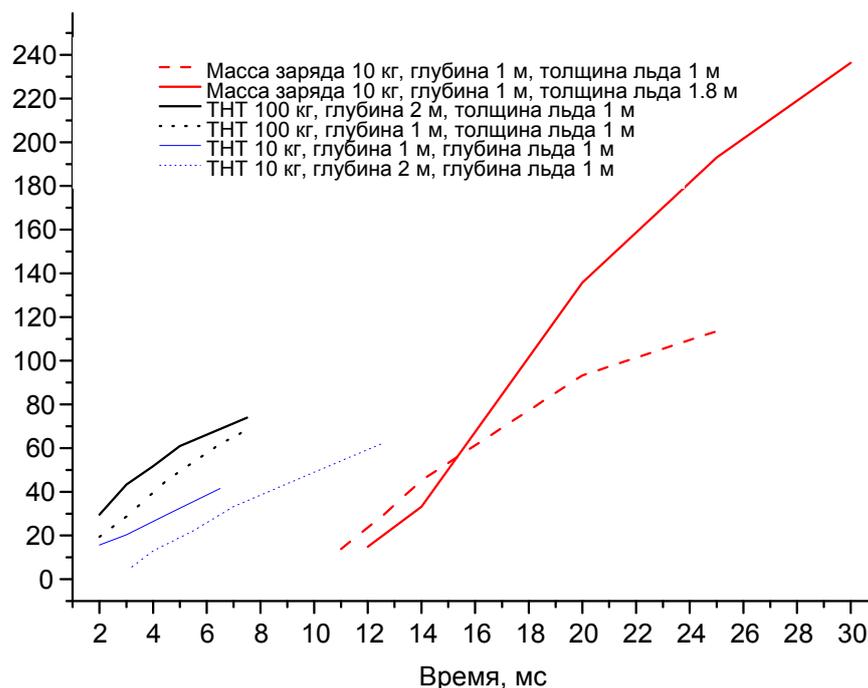


Рис. 18. Зависимости массы вовлеченного в движение льда от времени.

Проведенная оценка эффективности взрывов смесей, богатых алюминием, позволяет сделать следующие выводы:

- Термодинамическая эффективность смесевых составов не менее чем в 2.4 раза превосходит использование в качестве источника волны сжатия тротила.

- Заряд нового типа показывает в случае применения в практической задаче разрушения льда по нижней оценке сравнительно большую эффективность, нежели заряды тротила с в 10 раз большей массой, что связано, в большей степени, с перераспределением энергии волны сжатия на большую площадь и более длительными временами воздействия на лед.

Часть работы выполнена в рамках проекта МНТЦ KR899.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Oppenheim A.K.* Dynamics of explosions in FAE mixtures. NASA STAR. 1978. V.16. No.1
2. *Lee J.H., Moen I.* Fundamental mechanisms of unconfined detonation in FAE. AFOSR TR-76-1426. 1979.
3. *Гельфанд Б.Е., Сильников М.В.* Объемные взрывы. СПб.: Астерион, 2008.
4. *Комиссаров П.В., Соколов Г.Н., Борисов А.А.* Особенности подводного взрыва неидеально детонирующего энергетического материала, богатого алюминием. Хим. Физика, 2011, Т. 30, № 2, С 62-69.
5. *Дремин А.Н.* К теории детонации. Хим. физика. 1995, Т. 14, № 12, С. 22-40.
6. *Ермолаев Б.С., Беляев А.А., Викторов С.Б., Слепцов К.А., Жарикова С.Ю.* Неидеальные режимы дефлаграции и детонации дымного пороха. Хим. Физика, 2010, Т. 20, № 5, С. 48-60.
7. *Борисов А.А., Михалкин В.Н., Хомик С.В.* Экспериментальное исследование распространения детонации газообразных смесей в свободном цилиндрическом заряде. Хим. Физика, 1989, Т. 8, № 6, С.798-809.
8. *Борисов А.А., Комиссаров П.В., Маилков А.Е., Ельшин Р.Н., Силакова М.А.* Взрывное взаимодействие богатой алюминием реагирующей гетерогенной смеси с водой. Хим. Физика, 2002. Т. 21. № 10. С. 92-96.
9. *P.V. Komissarov et al.* Novel high-efficiency metallized explosive systems for underwater applications in industry. Chapter 1. Final Technical Report, ISTC Project KR-899, 2005.
10. *Борисов А.А., Гельфанд Б.Е., Низматулин Р.И., Рахматулина Х.А., Тимофеев Е.И.* Усиление ударных волн в жидкостях с пузырьками пара и растворяемого газа. Докл. Акад. Наук СССР. 1982. Т. 263. № 3. С. 594-598.
11. Физика Взрыва. Орленко Л.П. ред. М.: Физматгиз, 2002. Т.1. Гл. 13.
12. *Коул Р.* Подводные взрывы. М.: Изд. ин. Лит., 1950.
13. *Горельский В.А., Зелепугин С.А., Никуличев В.Б., Смолин А.Ю.* Трехмерный расчет высокоскоростного удара методом конечных элементов с учетом химических реакций. Труды Международной конференции «Средства математического моделирования», Санкт-Петербург, 1998, с. 104-113.

Статья поступила в редакцию 5 апреля 2011 г.