

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ СМЕСЕВЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ НЕИДЕАЛЬНОЙ ДЕТОНАЦИИ В УСЛОВИЯХ, БЛИЗКИХ К УСЛОВИЯМ РАБОТЫ ЗАРЯДА В ШПУРЕ

А. В. Ананьин<sup>1</sup>, А. Н. Дрёмин<sup>1</sup>, К. Каннингхэм<sup>2</sup>, С. А. Колдунов<sup>1</sup>,  
Б. П. Крюков<sup>1</sup>, А. В. Лебедев<sup>1</sup>, Ю. М. Литвинов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка, dremin@icp.ac.ru

<sup>2</sup>African Explosives Ltd, Modderfontein, South Africa

В специально разработанном взрывном устройстве, имитирующем шпур, проведены эксперименты с зарядами мелкозернистой и крупнозернистой (гранулированной) смеси тротил/аммиачная селитра 30/70, которые при одинаковой плотности  $0.89 \text{ г/см}^3$  детонировали в стальной оболочке с внутренним диаметром 28 мм и толщиной стенок 3 мм со скоростями 4.13 и 2.13 км/с соответственно. Несмотря на значительное различие в скоростях (давлениях) детонации, наблюдалось одинаковое расширение оболочек зарядов. С другой стороны, численные расчеты, моделирующие распространение детонации во взрывном устройстве с соответствующими скоростями без учета возможности выделения энергии за фронтом волны, показывают, что расширение оболочки заряда всегда больше в случае высокоскоростного режима. Сделан вывод о том, что в исследуемых условиях, имитирующих распространение детонационного процесса и работу продуктов взрыва в шпуре, за фронтом детонации низкоскоростного (неидеального) режима имеет место эффективное довыделение энергии.

Ключевые слова: смешанное ВВ, гранулированные составы, неидеальная детонация, полнота энерговыделения, расширение оболочки, шпур.

### ВВЕДЕНИЕ

Для смешанных составов типа горючее — окислитель, к которым в подавляющем большинстве относятся промышленные взрывчатые вещества (ВВ), вопросы полноты выделения химической энергии в детонационном процессе всегда занимали особое место в общей проблеме разработки и эффективного применения таких ВВ. За последние десятилетия эти вопросы приобрели актуальность с экологической точки зрения, прежде всего в связи с внедрением и широким использованием крупнодисперсных (гранулированных) составов [1]. Такие составы не отличаются высокой детонационной способностью и в силу достаточно больших критических диаметров детонации (до 100 мм и более) детонируют, как правило, в неидеальном режиме. В этом случае на поддержание волны идет не вся энергия, которая отвечает термохимической полноте превращения и которая, в принципе, и определяет максимально возможные параметры идеальной детонации исходной взрывчатой смеси. Следова-

тельно, полноту энерговыделения при распространении в смешанном ВВ неидеальной детонации следует связывать с тем, что разложение исходных компонентов смеси, сопровождающееся химическим взаимодействием продуктов этого разложения с выделением энергии, может продолжаться за пределами детонационного фронта. Надо отметить, что неидеальные режимы детонации могут использоваться вполне целенаправленно для получения оптимального в технологическом отношении результата, в том числе в горнодобывающей промышленности при подрывах соответствующих зарядов в шпурах. В этой отрасли масштабы использования промышленных ВВ особенно велики и проблемы полноты и экологии взрыва стоят наиболее остро, тем более что в качестве окислителя традиционно и в больших объемах используется аммиачная селитра (нитрат аммония).

Очевидно, что при детонации в шпуре в меньшей степени по сравнению с детонацией открытого заряда должно сказываться неблагоприятное влияние разрежения на процесс энерговыделения, в том числе и как фактора, способного при соответствующем интен-

Работа выполнена в рамках проекта МНТЦ (№ 2301р).

сивном спаде давления в реагирующей среде «заморозить» химические процессы на стадии образования промежуточных продуктов. С другой стороны, продукты детонации в шпуре могут достаточно долго (до нескольких миллисекунд) находиться в условиях повышенных давлений и температур. Поэтому нельзя исключить, что неполнота энерговыделения в случае неидеальной детонации будет существенно восполнена за счет продолжения превращения в области непосредственно за фронтом детонации, включающей зону дозвукового потока и зону влияния [2], а также на гораздо более поздних стадиях, в частности после прохождения детонации. В первом случае следует ожидать наиболее ощутимого вклада продолжения превращения в работу, производимую химическим взрывом, тогда как превращение на более поздних стадиях преимущественно будет влиять на экологию, поскольку возможно образование вредных оксидов.

В настоящей работе предпринята попытка получить (хотя бы на качественном уровне) ответ на вопрос, происходит ли довыделение энергии смесового ВВ за фронтом неидеальной детонации в условиях, приближенных к условиям ее прохождения в шпуре. С этой целью разработано взрывное устройство, имитирующее шпур, и выполнены эксперименты с зарядами смесового ВВ, которые детонировали с различной степенью неидеальности.

### СМЕСЕВОЕ ВВ И ЗАРЯДЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве ВВ выбрана смесь тротила (ТНТ) с аммиачной селитрой (АС), которая составляет основу широко известных промышленных ВВ, так называемых аммонитов (мелкокристаллические порошкообразные составы) и зерногранулитов (гранулированные составы). Задача заключалась в том, чтобы изготовить из такой смеси заряды, одинаковые по размерам, составу, начальной плотности, но детонирующие с существенно различной степенью неидеальности только за счет различий в размере частиц. В реальном эксперименте это приводит к необходимости получать максимальные отличия в скоростях детонации зарядов при некотором одинаковом и, по возможности, наименьшем их диаметре, т. е. количестве подрываемого ВВ. Очевидно, что при этом диаметр заряда будет определяться таким его значением, при котором в заряде крупнодисперс-

ного ВВ в данных условиях еще возможна реализация минимального по скорости устойчивого (незатухающего) режима детонации. В этой связи была выполнена предварительная серия экспериментов с зарядами в стальных оболочках различного диаметра ( $d = 20, 24, 28$  и  $32$  мм) с толщиной стенок  $\Delta = 3$  мм. Размер гранул компонентов смеси находился в пределах  $\delta = 1.0 \div 2.5$  мм, что отвечало исходному размеру гранул влагоустойчивой аммиачной селитры (производство компании ICI Canada Inc.). Для тротила указанный диапазон размеров обеспечивался отсевом от промышленного гранулофильтра (ГОСТ 25857-83) более крупных и мелких гранул. Отметим, что использование металлической оболочки позволило существенно повысить детонационную способность гранулированной смеси (зерногранулита) и определить приемлемый для проведения взрывных экспериментов диаметр зарядов. В дальнейшем стальная оболочка заряда составила неотъемлемую и важную часть конструкции разработанного экспериментального взрывного устройства (ВУ), которая обеспечивала герметизацию и длительное удержание продуктов взрыва в пределах некоторого ограниченного объема.

В указанной предварительной серии экспериментов заряды подрывались таблеткой пресованного ТГ 50/50 диаметром 20 мм. Таблетка устанавливалась на слой аммонита 6ЖВ, засыпаемого непосредственно на ВВ в оболочку заряда на глубину, равную примерно половине диаметра заряда  $d$ . О возможности распространения взрывного процесса в детонационной форме судили по характеру разрушения стальной оболочки.

Эксперименты показали, что наиболее энергоемкая стехиометрическая смесь ТНТ/АС 21/79 явно не способна к устойчивой детонации в стальной оболочке толщиной  $\Delta \approx 3$  мм в том случае, если ее внутренний диаметр меньше 28 мм. В качестве рабочего был выбран диаметр  $d = 28$  мм. При этом основным объективным критерием возможности устойчивого распространения детонации в такой оболочке были результаты измерения скорости фронта  $D$  в зарядах длиной  $(20 \div 25)d$ . Значения  $D$  определялись по данным регистрации времени прохождения нескольких (от трех до восьми) баз длиной  $50 \div 100$  мм. В качестве отметчиков времени использовались электроконтактные датчики

игольчатого типа, устанавливаемые на внешней стороне оболочки, при этом нарушение сплошности и изменение толщины оболочки не допускались. В отдельных экспериментах использовались пьезодатчики с чувствительным элементом из пьезокерамики [3], которые выполняли в основном дублирующую роль, контролируя надежность результатов, полученных электроконтактным методом. В частности, они позволяли убедиться, что упругие возмущения в стальной оболочке, опережающие фронт основного процесса, не оказывают влияния на результат измерения скорости фронта.

Результаты измерений показали, что в оболочке диаметром  $d = 28$  мм с толщиной стенки  $\Delta = 3$  мм гранулированная смесь ТНТ/АС стехиометрического состава (начальная плотность  $\rho_0 = 0.86$  г/см<sup>3</sup>) не способна к устойчивой детонации: после прохождения начального участка длиной около  $10d$  со скоростью  $D \approx 1.9$  км/с наблюдалась явная тенденция к уменьшению скорости. Увеличение толщины оболочки на 1 мм приводило к некоторому увеличению скорости  $D$  на начальном участке, но не обеспечивало ее устойчивости в пределах длины  $20d$ . Устойчивый режим со скоростью  $D = 2.2 \div 2.3$  км/с был зарегистрирован в трубе с внутренним диаметром 32 мм. Однако, чтобы избежать нежелательного увеличения диаметра заряда, было решено реализовать устойчивый низкоскоростной режим в оболочке диаметром 28 мм и толщиной 3 мм за счет увеличения содержания гранулолола в смеси. Было найдено, что гранулированная смесь ТНТ/АС 30/70 плотностью  $\rho_0 = 0.89$  г/см<sup>3</sup> в стальной оболочке диаметром 28/34 мм устойчиво детонирует со скоростью  $D = 2.13 \pm 0.05$  км/с. При этом, поскольку условия распространения детонации были близки к предельным, для обеспечения стабильности результатов возникла необходимость при приготовлении смеси выдерживать массовое соотношение гранул ТНТ по размерам, которое в итоге составило: 22 % для  $1.0 \leq \delta \leq 1.5$  мм; 53 % для  $1.5 \leq \delta \leq 2.0$  мм; 25 % для  $2.0 \leq \delta \leq 2.5$  мм. В случае АС такой необходимости не было, так как значительная доля (около 75 %) исходного продукта приходилась на гранулы размером  $2.0 \div 2.5$  мм.

Измерения скорости детонации в зарядах мелкозернистой смеси такого же состава и

плотности, но с размером частиц  $\delta \leq 0.1$  мм (смесь готовилась на основе аммонита 6ЖВ с добавлением порошкообразного тротила) показали, что такие заряды в стальной оболочке диаметром 28/34 мм детонируют со скоростью  $D = 4.13 \pm 0.05$  км/с.

Определение параметров детонации в исследуемых зарядах из гранулированной и мелкозернистой смеси ТНТ/АС 30/70 (далее зерногранулит 30/70 и аммонит 30/70) осуществлялось с помощью электромагнитного метода. При регистрации временных профилей массовой скорости  $U(t)$  детонационных волн использовался ступенчатый электромагнитный датчик, который позволяет в одном опыте наряду с массовой скоростью определять скорость детонации  $D$ . Датчики изготавливались из алюминиевой фольги толщиной 0.12 мм, рабочая поверхность датчиков составляла  $10 \times 10$  мм.

Чтобы избежать возможных электромагнитных наводок, а также повреждения установки осколками стальной оболочки зарядов, регистрацию профиля  $U(t)$  планировалось провести на зарядах не в металлической, а в картонной оболочке (толщина  $0.4 \div 0.5$  мм). В связи с этим предполагалось для зерногранулита и аммонита найти диаметры зарядов, при которых детонация распространялась бы с теми же скоростями, что и в стальной оболочке, а именно  $2.13 \pm 0.05$  км/с и  $4.13 \pm 0.05$  км/с соответственно. Для мелкозернистой смеси (аммонит 30/70) такой диаметр оказался равным 55 мм. На рис. 1,а приведена осциллограмма  $U(t)$  профиля детонационной волны в этом заряде длиной  $6d$ . Из осциллограмм были определены максимальная массовая скорость на фронте волны (химпик)  $U_f = 2.30 \pm 0.02$  км/с, массовая скорость в точке излома (звуковая точка)  $U_s = 1.51 \pm 0.02$  км/с, ширина химпика  $t_s \approx 1$  мкс. Соответствующие значения давления ( $p = \rho_0 D U$ ) и показателя политропы ( $n = D/U_s - 1$ ) составили  $p_f = 8.34$  ГПа,  $p_s = 5.55$  ГПа и  $n = 1.74$ .

Нетривиальная ситуация сложилась, однако, при попытке определить параметры детонации, распространяющейся со скоростью  $D = 2.13$  км/с в зерногранулите 30/70, при использовании картонной оболочки. Эксперименты по измерению скорости детонации показали, что в зарядах диаметром 70 и 75 мм детонация затухает, а при диаметре 80 мм стационарно распространяется со скоростью  $2.82 \pm 0.02$  км/с на всю длину заряда (до  $7d$ ). (Более подроб-

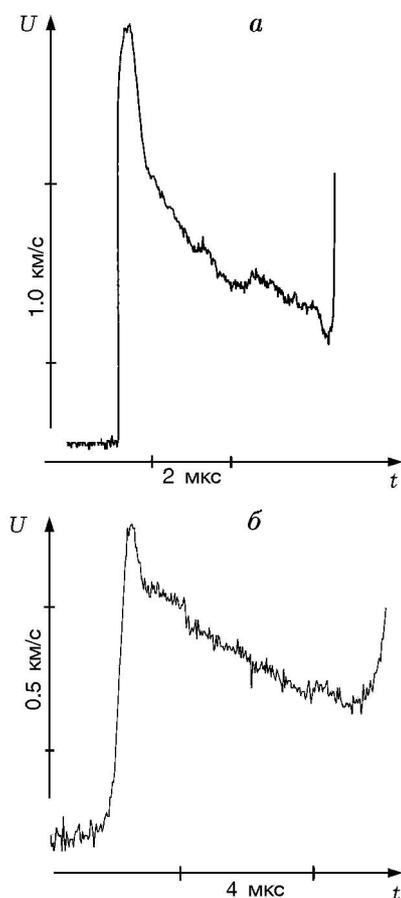


Рис. 1. Профили массовой скорости детонационной волны в зарядах ТНТ/АС 30/70:

*a* — мелкозернистый состав (картонная оболочка, диаметр 55 мм); *б* — гранулированный состав (оболочка из нержавеющей стали, диаметр 28 мм, толщина  $\Delta = 3$  мм); второй всплеск на осциллограммах соответствует приходу фронта волны к дополнительной ступеньке электромагнитного датчика

но обсуждаемые в настоящей работе результаты по скорости детонации для гранулированной смеси представлены в [4].) Были проведены опыты с зарядами в картонной оболочке диаметром  $77 \div 78$  мм с регистрацией профиля  $U(t)$  ступенчатым электромагнитным датчиком. Оказалось, что скорость детонации такого заряда от опыта к опыту колеблется в диапазоне  $2.35 \div 2.50$  км/с. Из полученных данных следовало, что реализация режима детонации исследуемого зерногранулиата 30/70 со скоростью 2.13 км/с в заряде с картонной оболочкой невозможна в принципе. То есть критическая скорость детонации (скорость детонации

заряда критического диаметра) этого вещества в картонной оболочке больше 2.13 км/с. Отметим, что намерение регистрировать  $U(t)$  в зарядах в картонной оболочке при распространении детонации с той же скоростью, что и в зарядах в стальной оболочке, было основано на предположении, что структура потоков во фронте детонационных волн по оси зарядов в обоих случаях одинакова. Но, как следует из вышеизложенного, по-видимому, это не так. Поэтому для определения массовой скорости во фронте детонационной волны, распространяющейся в зерногранулиате со скоростью  $\approx 2.13$  км/с, было решено вернуться к металлическим оболочкам диаметром 28 мм и толщиной 3 мм, в которых этот режим реализуется, но использовать оболочки из нержавеющей (немагнитной) стали. Оказалось, что в этом случае, помимо многочисленных помех и относительно больших «завалов» фронтов, характерных, как правило, для осциллограмм  $U(t)$ , регистрируемых в крупнозернистых реагирующих средах, увеличивалась степень невоспроизводимости результатов. Не исключено, что это обстоятельство связано с присутствием и движением металла в магнитном поле. Чтобы добиться осциллограмм приемлемого качества и достоверного результата, эксперименты неоднократно повторялись. На рис. 1, *б* приведена одна из таких осциллограмм (использовался датчик из алюминиевой фольги толщиной 0.3 мм). Параметры детонации, распространяющейся в исследуемом зерногранулиате 30/70 со скоростью около 2.13 км/с, следующие: максимальная массовая скорость на фронте волны (химпик)  $U_f = 1.05 \pm 0.05$  км/с, массовая скорость в звуковой точке (в точке излома)  $U_s = 0.85 \pm 0.03$  км/с, ширина химпика  $t_s = 1.62$  мкс. Соответствующие значения давлений и показателя политропы составляют  $p_f = 2.06$  ГПа,  $p_s = 1.65$  ГПа и  $n = 1.51$ .

В заключение отметим, что давление в продуктах детонации  $p_s$  в наиболее близком к идеальному режиму детонации со скоростью  $D = 4.13$  км/с примерно в 3.5 раза отличается от неидеального режима со скоростью  $D = 2.13$  км/с. Примерно во столько же раз отличается и полнота детонационного превращения (тепловыделения  $Q$ ). При этом оценка степени энерговыведения в пределах детонационного фронта проведена по зависимости  $D \sim \sqrt{Q}$ .

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ВЗРЫВНОЕ УСТРОЙСТВО

Разработанное для проведения исследований взрывное устройство (ВУ) (рис. 2) состоит из двух коаксиальных стальных труб, свободное пространство между которыми заполнено сухим песком. Внутренняя труба является оболочкой исследуемых зарядов. Внешняя труба служит оболочкой ВУ и представляет собой массивный цилиндр длиной 600 мм с толщиной стенки 60 мм и внутренним диаметром 100 мм, который при взрывах должен испытывать только упругие (обратимые) деформации. Численные расчеты, моделирующие процесс распространения детонации в таком ВУ, показали, в частности, что диаметр 100 мм близок к тому минимальному, при котором давление на границе песок — стенка ВУ не будет превышать предела упругости материала цилиндра ( $1.3 \div 1.5$  ГПа) при подрыве в ВУ наиболее мощного из исследуемых зарядов ( $D = 4.13$  км/с). Оказалось также, что в этом случае толщины слоя песка (33 мм) достаточно, чтобы максимальное расширение оболочки зарядов (до некоторого радиуса  $R_{\max}$ ) под действием продуктов их детонации ограничилось

бы значением  $R_{\max} \approx (1.5 \div 1.8)R_0$  [5], при котором процесс трещинообразования, по крайней мере, еще только начинается. То есть можно было полагать, что обеспечено важное для правильного толкования результатов условие эксперимента: по возможности длительное пребывание в ВУ исходной массы продуктов превращения в пределах замкнутого объема. Оболочка ВУ скрепляется с массивным стальным неразрушаемым основанием. Заряд центрируется с помощью деревянных колец толщиной 2 см. ВУ используется в вертикальном положении.

Конструкция основания и крышки ВУ позволяла относительно легко вводить в него шнур из пластического ВВ для возбуждения детонации зарядов, а также обеспечивать вывод кабелей измерительных линий таким образом, чтобы они могли надежно функционировать в течение достаточно длительного времени, необходимого для регистрации рабочих сигналов от соответствующих датчиков. При этом, как было установлено экспериментально, продукты детонации могут удерживаться внутри ВУ в течение не менее 1 мс. Измерения скорости детонации  $D$  в исследуемых зарядах, проведенные непосредственно в ВУ, показали, что каких-либо отличий от полученных ранее результатов не наблюдается. В этих измерениях в качестве отметчиков времени использовались только пьезокомпозиционные датчики. Были предприняты попытки применить датчики с пьезокомпозиционным элементом для непрерывной регистрации изменения давления в различных участках объема ВУ, т. е. в сложных условиях неоднородного и длительного взрывного нагружения. Реальной предпосылкой для этого служил экспериментально установленный ранее факт слабого отклика чувствительного элемента датчика из специально изготовленной пьезопленки на напряжение (деформацию) сдвига [3]. К сожалению, воспроизводимые и поддающиеся объяснению сигналы напряжения — время регистрировались только при расположении датчиков на торце заряда, как показано на рис. 2. В этом случае для обоих типов зарядов регистрировался спадающий во времени профиль давления, что свидетельствует, в принципе, о монотонном характере энерговыделения и об отсутствии явно выраженных (проявляющихся газодинамически) интенсивных процессов «догорания» на некотором удалении от детонационного фронта.

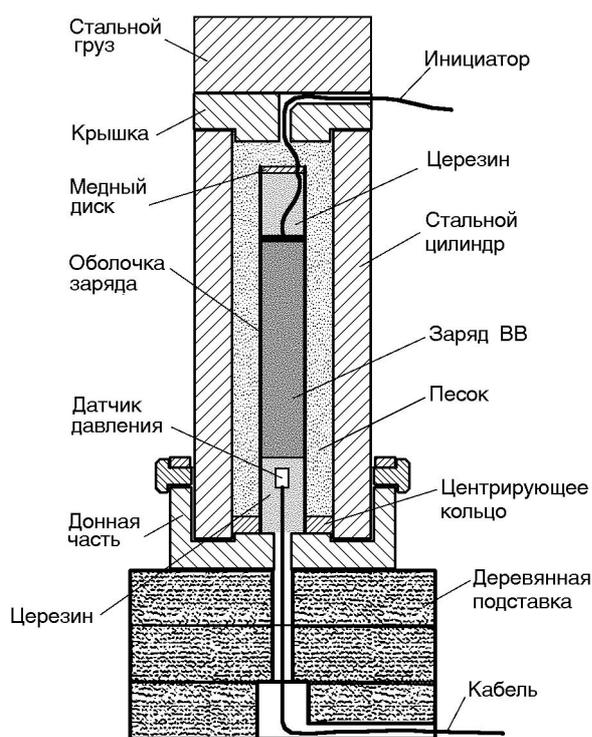


Рис. 2. Схема взрывного устройства

## ИССЛЕДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВЗРЫВНОГО УСТРОЙСТВА

Неполнота детонационного превращения, т. е. неполнота тепловыделения в пределах детонационного фронта, непосредственно приводит не только к уменьшению скорости детонации, но и к снижению работоспособности продуктов детонации только уже в силу уменьшения в них начального давления. Однако на конечный результат по работоспособности, например, при перемещении и сжатии окружающей среды, заметное влияние может оказать полнота взрыва в целом, т. е. энергосодержание за пределами детонационного фронта. Возможность такой ситуации следует, в частности, из сопоставления представленных ниже результатов численного и физического эксперимента по расширению металлических оболочек зарядов, детонирующих с существенно различными скоростями в условиях ВУ, т. е. в условиях, имитирующих распространение процесса и работу взрыва в шпуре.

### 1. Численное моделирование процесса детонации во взрывном устройстве

При численном моделировании процесса распространения детонации учитывались основные принципиальные особенности конструкции и характерные размеры экспериментального ВУ: заряд ВВ в цилиндрической стальной оболочке, по которому распространяется детонация; слой песка между оболочками заряда и ВУ. Для описания нестационарного движения среды в объеме ВУ использован метод численного моделирования, построенный на представлении сплошной среды в виде дискретных лагранжевых частиц. При этом для численного расчета процесса нагружения стальной оболочки детонационной волной применялся программный комплекс стерео-РС, в основу которого положен метод интегрирования системы уравнений механики сплошной среды — метод «индивидуальных частиц» [6].

Для моделирования процесса распространения детонации использовалась модель, описанная в [7]. В частности, расчет стационарной детонационной волны проводился по модели детонации, основанной на принципе Гюйгенса, когда превращение частицы ВВ в продукты детонации, описываемое уравнением состояния идеального газа, происходит в соот-

ветствии с известной скоростью детонации ВВ. Этот подход позволяет рассчитывать произвольные ВВ, для которых заданы начальная плотность  $\rho_0$ , скорость детонации  $D$  и показатель политропы продуктов детонации  $n$ .

Численное моделирование выполнялось в гидродинамическом приближении, т. е. упругопластические свойства материалов ВУ не учитывались. При этом стенки ВУ считались абсолютно жесткими и не имели ограничений по толщине. В расчетах по нагружению оболочек использовалась ударная адиабата железа [8]  $D = 3.80 + 1.58U$  для  $\rho_0 = 7.85 \text{ г/см}^3$ , а также ударная адиабата песка  $D = 0.71 + 1.70U$  при  $\rho_0 = 1.67 \text{ г/см}^3$ , экспериментально определенная в области давлений ударных волн  $p \leq 1.0 \text{ ГПа}$  [9]. Плотность песка в ВУ составляла  $1.65 \text{ г/см}^3$ , и это значение использовалось в расчетах. Модельное ВВ плотностью  $\rho_0 = 0.89 \text{ г/см}^3$  описывалось уравнением состояния в форме Тэта:  $p = A[(\rho/\rho_0)^N - 1]$ , где  $A = 4.5 \text{ ГПа}$  и  $N = 0.5$ . В этом случае рассчитанная по уравнению Тэта скорость звука в ВВ составляет  $1.58 \text{ км/с}$  и картина течения при распространении детонации со скоростью  $D = 2.13 \text{ км/с}$  не будет искажаться. Возможность продолжения превращения вещества за пределами детонационного фронта не учитывалась. Изменение давления продуктов взрыва за детонационным фронтом в волне разрежения описывалось политропой с показателем  $n = 2$ . Давление детонации рассчитывалось по формуле  $p = \rho_0 D^2 / (n + 1)$ .

На рис. 3 приведена расчетная газодинамическая картина положения ударных фронтов и стальной оболочки заряда с толщиной стенки  $3 \text{ мм}$ , возникающая в модельном ВУ при скорости детонации  $D = 4.13 \text{ км/с}$ . Детонация инициировалась в центральной точке, расположенной на поверхности раздела заглушка — ВВ. Длина заряда в расчетной области ( $350 \text{ мм}$ ) составляла  $275 \text{ мм}$ . Участок выхода детонации на стационарный режим не превышал  $80 \text{ мм}$ . На рис. 3 отмечены: фронт детонации (1–1); фронт косоударной волны в песке (1–2); фронт отраженной от стенки ВУ ударной волны (2–3) и область взаимодействия (3–4) отраженной ударной волны с расширяющейся оболочкой заряда. Положение оболочки заряда при ее максимальном расширении ( $R_{\text{max}}$ ) под действием продуктов детонации отмечено горизонтальной пунктирной линией. С этого значения радиуса оболочка испытывает тормозящее воздействие от-

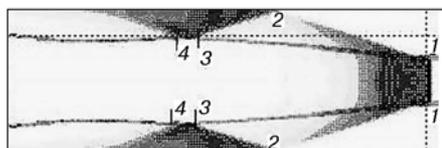


Рис. 3. Расчетная газодинамическая картина в модельном ВУ на момент подхода детонационного фронта к торцу заряда:  $\Delta = 3$  мм,  $D = 4.13$  км/с:

1-1 — фронт детонации, 1-2 — фронт косой ударной волны, 2-3 — фронт отраженной от стенки ВУ ударной волны, 3-4 — область взаимодействия отраженной ударной волны с расширяющейся оболочкой заряда

раженной волны (2-3). При этом видно, что оболочка претерпевает возвратное движение, т. е. поджимается до некоторого радиуса  $R_{\min}$ . Отметим, что согласно проведенным расчетам взаимодействие отраженной волны с расширяющейся оболочкой толщиной 5 мм ограничивается фактически только ее торможением.

В табл. 1 приведены данные модельных расчетов расширения оболочки заряда при различных скоростях детонации  $D$ . Здесь  $R_0$  и  $\Delta$  — внешний радиус и толщина оболочки заряда соответственно,  $t_{\max}$  — время расширения оболочки до  $R_{\max}$ ,  $p$  — давление детонации. Видно, что большей скорости  $D$  (давлению  $p$ ) всегда соответствует большая степень расширения оболочек.

Следует отметить, что указанные расчеты выполнены с рядом допущений (не учитывалась прочность оболочки зарядов, расчет отраженной ударной волны в песке проводился с использованием ударной адиабаты однократного сжатия, показатель политропы продуктов взрыва был принят постоянным,  $n = 2$ ), которые не позволяют воспроизвести количественно истинное развитие процессов взаимо-

действия продуктов детонации с оболочкой заряда и оболочки заряда с песком. Однако вытекающее из расчетов различие в степени расширения оболочек под действием продуктов детонации, распространяющейся с существенно различными скоростями, в качественном отношении сомнений не вызывает.

## 2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Эксперименты проводились в соответствии со схемой, представленной на рис. 2. Для возбуждения детонации находящегося в ВУ заряда использовался инициирующий узел, который состоял из кругового слоя мощного пластического ВВ толщиной 3 мм с прикрепленным к нему в центре шнуром из того же ВВ. Надежность крепления и устойчивое положение шнура относительно основного слоя ВВ обеспечивались заливкой мастики на основе перезина (перезиновой пробкой). Иницирующий узел находился в непосредственном контакте с исследуемым веществом внутри стальной оболочки заряда на расстоянии  $40 \div 50$  мм от ее торца. Этот участок оболочки (трубы) использовался под забойку (перезиновая пробка, песок, медный диск с прорезью для шнура). Передаваемый по шнуру детонационный импульс инициировал детонацию слоя пластического ВВ и исследуемого заряда. При общей длине стальной оболочки около 575 мм длина засыпки собственно исследуемого ВВ составляла не менее 470 мм. Начальный участок выхода детонации на устойчивый скоростной режим не превышал 50 мм. На рис. 4 представлены фотографии исходной оболочки зарядов и оболочек, извлеченных из ВУ после детонации в них мелкозернистого и гранулированного состава ТНТ/АС 30/70. Экспериментальные данные по расширению оболочек зарядов приведены в табл. 2. Видно, что в отличие от результатов численного моделирования (см. табл. 1) в физическом эксперименте оболочки зарядов, детонирующих с различными скоростями, претерпевают одинаковое расширение. То есть при существенно различном энерговыделении в пределах детонационного фронта работа расширения, произведенная продуктами детонации, оказывается одинаковой. Такой результат следует рассматривать как прямое указание на эффективное выделение энергии за фронтом неидеальной детонации, полагая при этом, что одинаковое конечное расши-

Таблица 1

Результаты расчетов по расширению оболочек зарядов

$D$ , км/с	$p$ , ГПа	$R_0$ , мм	$\Delta$ , мм	$R_{\max}(R_{\min})$ , мм	$t_{\max}$ , мкс	$R_{\max} - R_0$ , мм
2.13	1.35	17	3	28 (26)	51.6	11
		19	5	29 (нет)	52.1	10
4.13	5.08	17	3	32 (30)	40.2	15
		19	5	33 (нет)	40.4	14

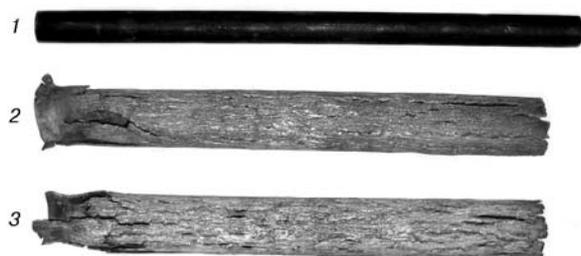


Рис. 4. Стальные оболочки зарядов:

*a* — исходная диаметром 28/34 мм; *b*, *в* — после прохождения детонации со скоростью 2.13 км/с (*b*) и 4.13 км/с (*в*) в зарядах гранулированной и мелкозернистой смеси ТНТ/АС 30/70; нижний торец — слева

Т а б л и ц а 2

Результаты экспериментов  
по расширению оболочек зарядов

$D$ , км/с	$p_s$ , ГПа	$R_0$ , мм	$\Delta$ , мм	$R_{\max}$ , мм	$R_{\max} - R_0$ , мм
2.13	1.61	17	3	30 ÷ 31	13 ÷ 14
		19	5	32 ÷ 33*	13 ÷ 14
4.13	5.55	17	3	30 ÷ 31	13 ÷ 14
		19	5	32 ÷ 33	13 ÷ 14

Примечание. \*Данные для гранулированной смеси ТНТ/АС 21/79, которая в оболочке толщиной 5 мм устойчиво детонировала со скоростью  $2.13 \pm 0.05$  км/с.

рение оболочек при детонации зарядов двух типов обусловлено близким по величине выделением их энергии в имитирующем шпур устройстве. (В этой связи необходимо обратить внимание на исследования [10], которые по постановке и выводам достаточно близки к настоящим исследованиям.)

Следует, однако, отметить, что существовали доводы, которые могли поставить под сомнение сделанный вывод. Так, например, возникло опасение, что одинаковое конечное расширение оболочек обусловлено не одинаковым выделением энергии при детонации зарядов мелкозернистого и грубозернистого ВВ, а является случайным совпадением, связанным со специфическим действием на оболочку ударных волн, отраженных от основной массивной оболочки ВУ. Дело в том, что расчеты расширения оболочки толщиной 3 мм показали, что такое влияние существует (см. табл. 1). В этом случае оболочки зарядов, детонирую-

щих с различными скоростями, достигали различного максимального расширения и затем несколько поджимались под действием отраженных ударных волн. Поэтому можно было предположить, например, что максимальное расширение оболочек под действием непосредственно продуктов детонации зарядов мелко- и крупнозернистого ВВ было различным, но конечный результат под действием отраженных ударных волн за счет поджатия оказался одинаковым. Однако такую трактовку нельзя признать состоятельной, даже исходя из уже имеющихся расчетных данных. В частности, согласно расчетам влияние отраженной ударной волны на оболочку толщиной 5 мм практически сводится только к ее торможению (без заметного эффекта поджатия). В то же время в физическом эксперименте расширение таких оболочек, как и оболочек толщиной 3 мм, оказывается одинаковым, несмотря на существенное различие параметров детонации используемых зарядов смесового ВВ. Как уже отмечалось, расчеты отраженных ударных волн в песке ввиду отсутствия ударной адиабаты двукратного сжатия были проведены с использованием ударной адиабаты его однократного сжатия. Поэтому, хотя расчеты и продемонстрировали влияние отраженной ударной волны на конечное расширение оболочек, на их основании судить о степени и характере проявления этого влияния в реальных экспериментах нельзя.

Для выяснения влияния отраженных ударных волн на расширение оболочек зарядов, детонирующих в ВУ, были выполнены специальные эксперименты. На оболочке заряда по ходу распространения детонации располагались кольца из медной (толщиной 0.2 мм) или алюминиевой (0.12 мм) фольги. Их внутренний диаметр равнялся диаметру металлической оболочки заряда (34 мм), а внешний — внутреннему диаметру массивного цилиндра ВУ (100 мм). То есть исходная ширина кольца равнялась толщине слоя песка между оболочкой заряда и стенкой ВУ. Анализ колец, сохранившихся после подрыва обоих типов зарядов, показал, что масса колец и их внешний диаметр не изменились, а диаметр внутреннего отверстия с точностью измерения  $\pm 0.5$  мм соответствовал внешнему диаметру расширившихся после детонации оболочек зарядов (60 ÷ 62 мм). Таким образом, ширина колец по прохождении детонации как с малой, так и с большой скоростью оказывалась рав-

ной толщине слоя сжатого песка между расширившимися оболочками зарядов и внутренней стенкой стального цилиндра ВУ. В совокупности полученные результаты свидетельствуют о том, что возвратное движение оболочки под влиянием отраженной ударной волны, которое наблюдалось в численном эксперименте при моделировании процесса в гидродинамическом приближении, в реальном физическом эксперименте отсутствует или, по крайней мере, является ничтожным. В противном случае следовало бы ожидать, что конечный диаметр расширившихся оболочек зарядов будет меньше внутреннего диаметра колец, так как маловероятно, что при изменении направления движения оболочки под действием отраженной волны металлическая фольга и окружающий ее песок окажутся в равной степени вовлеченными в обратное движение.

Подобные соображения находят подтверждение в аналогичных экспериментах с более мощным ВВ — гексогеном с плотностью  $\rho_0 = 1.0 \text{ г/см}^3$  и давлением в продуктах детонации  $p_s \approx 10 \text{ ГПа}$ . В этом случае ширина колец после подрыва также соответствовала зазору между расширившейся оболочкой заряда и стенкой ВУ. При этом оболочка расширялась заметно больше ( $64 \div 66 \text{ мм}$ ), чем в случае детонации зарядов менее энергоемкой смеси ТНТ/АС 30/70 ( $60 \div 62 \text{ мм}$ ). Этот факт показал также несостоятельность имевшихся опасений о том, что одинаковое расширение оболочек исследуемых зарядов связано с достижением некоторого «предельного» уровня сжимаемости слоя песка в ВУ и дальнейшее, даже незначительное сжатие потребует значительного увеличения прилагаемого давления.

Таким образом, одинаковое расширение оболочек зарядов при прохождении детонации в режимах с различной степенью неидеальности действительно свидетельствует о том, что в условиях, имитирующих шпур, совершается одинаковая работа расширения и соответственно выделяется одинаковое (близкое) количество энергии. Это означает, что за фронтом неидеального (низкоскоростного) режима детонации продолжается химическое превращение с энерговыделением, эффективным с точки зрения работоспособности и компенсации неполноты тепловыделения во фронте детонации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что в условиях, имитирующих шпур, при детонации смесевых зарядов, одинаковых по составу и плотности (ТНТ/АС 30/70,  $\rho_0 = 0.89 \text{ г/см}^3$ ), но отличающихся размером частиц и потому детонирующих с существенно различными скоростями (4.13 и 2.13 км/с), совершается одинаковая работа расширения и соответственно выделяется одинаковое (близкое) количество энергии. То есть при распространении детонационных процессов в смесевых составах ТНТ/АС в шпурах за фронтом неидеального (низкоскоростного) режима детонации продолжается выделение энергии, так что в итоге полнота превращения исходной смеси существенно приближается к полноте при идеальном режиме.

Авторы выражают благодарность В. Я. Андрианову, С. Ф. Кузнецову, Л. И. Савину и Л. А. Сметаниной за помощь в подготовке и проведении экспериментов, а также считают своим долгом отметить плодотворное участие в обсуждении и организации настоящих исследований на начальном этапе работ безвременного ушедшего из жизни С. С. Набатова.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дубнов Л. В., Бахаревич Н. С., Романов А. И. Промышленные взрывчатые вещества. М.: Недра, 1988.
2. Трофимов В. С., Дремин А. Н. О структуре фронта неидеальной детонации в твердых ВВ // Физика горения и взрыва. 1971. Т. 7, № 3. С. 427–428.
3. Шунин В. М., Набатов С. С., Сметанина Л. А., Якушев В. В. Электрический отклик гибких пьезокомпозиционных пленок на высокоскоростной удар сферического тела // Хим. физика. 1995. Т. 12, № 2–3. С. 159–165.
4. Колдунов С. А., Ананьин А. В., Литвинов Ю. М. К влиянию оболочки заряда на устойчивость и скоростные режимы детонации гранулированной смеси ТНТ/АС // Физические проблемы разрушения горных пород: Сб. тр. 4-й Междунар. науч. конф. М.: ИПКОН РАН, 2005. С. 311–313.
5. Одинцов В. А., Селиванов В. В., Чудов Л. А. Расширение идеально-пластической цилиндрической оболочки под действием продуктов детонации // ПМТФ. 1974. № 2. С. 152–155.

6. Агурейкин В. А., Крюков Б. П. Метод индивидуальных частиц для расчета течений многокомпонентных сред с большими деформациями // Численные методы механики сплошной среды. Новосибирск, 1986. Т. 17, № 1. С. 17–31.
7. Агурейкин В. А., Крюков Б. П., Охитин В. Н., Постнов В. Н. Расчет неоднородной детонационной волны в механически неоднородных ВВ высокой плотности // Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация: Материалы VI Всесоюз. симп. по горению и взрыву. Черноголовка, 1980. С. 90–92.
8. Физика взрыва / Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович, В. П. Челышев, Б. И. Шехтер. М.: Наука, 1975.
9. Брагов А. М., Грушевский Г. М. Влияние влажности и гранулометрического состава на ударную сжимаемость песка // Письма в ЖТФ. 1973. Т. 19, вып. 12. С. 70–72.
10. Хотин В. Г., Сабсай А. А. К оценке полноты взрывчатого превращения селективнодетонирующих взрывчатых веществ // Взрывное дело. № 72/29. М.: Недра, 1973. С. 15–20.

*Поступила в редакцию 5/V 2006 г.*

---