

УДК 534.222.2

НАГРУЖЕНИЕ ЭМУЛЬСИИ УДАРОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПЛАСТИНЫ

В. В. Сильвестров¹, А. В. Пластинин¹, А. С. Юношев^{1,2}¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, yunoshev@hydro.nsc.ru²Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

Проведено ударно-волновое нагружение чистой эмульсии на основе водного раствора аммиачной селитры, помещенной в стальную трубу внутреннего диаметра 114 мм. Достигнутое динамическое давление 30 ГПа, значительно превышающее расчетное давление детонации, не привело к развитию взрывного процесса.

Ключевые слова: эмульсионная матрица, ударное инициирование, сверхдетонационное давление.

DOI 10.15372/FGV20160316

ВВЕДЕНИЕ

В связи с возрастающим применением эмульсионных взрывчатых веществ (ЭМВВ) большое значение приобретают вопросы безопасности обращения с ними и их основным компонентом — эмульсионной матрицей (эмульсией). Основу любого ЭМВВ составляет обратная эмульсия типа вода в масле, жидкая или пастообразная композиция плотностью $1.35 \div 1.45 \text{ г/см}^3$ в зависимости от состава. Существует твердое убеждение, что взрыв матрицы без дополнительного химического или физического сенсibilизатора невозможен, хотя эмульсионная матрица — единственный компонент в составе ЭМВВ, способный к экзотермической реакции и, в принципе, к взрыву. Но однозначного доказательства этого утверждения нет.

Исследование ударного инициирования взрывного превращения в эмульсионной матрице соответствует основным тенденциям изучения взрывобезопасности современных промышленных ВВ. Интерес к ударному нагружению чистой матрицы (без порообразующего сенсibilизатора) и расчету ее детонационных характеристик впервые был проявлен зарубежными учеными [1–5]. Были получены данные по ударным адиабатам

матриц различного состава и расчетные оценки скорости и давления детонации. Позднее данное направление стало разрабатываться российскими исследователями [6–9]. Повышенный интерес вызывает поиск признаков инициирования химического превращения в матрице без сенсibilизатора [9, 10].

Для настоящего исследования интерес представляют результаты работ [3, 8], в которых предприняты попытки инициировать эмульсионную матрицу ударными волнами, генерируемыми взрывом контактных зарядов. В работе [3] заряд АС-эмульсии* диаметром 378 мм в оболочке из ПВХ нагружался взрывом боевика из прессованного состава С-3. Давление на границе боевик/заряд не более 17 ГПа. В работе [8] заряд АС/НС-эмульсии диаметром 95 мм нагружался взрывом боевика из пентолита 50/50. Давление на границе боевик/заряд не более 12 ГПа. По результатам измерения скорости процесса в конце заряда [3] или по характеру разрушения пластины-свидетеля [8] в обеих работах сделан вывод об отсутствии детонации в эмульсии. Приводимые выше давления оценены нами по адиабатам разгрузки продуктов взрыва боевиков в приближении изоэнтропийного газа с показателем политропы, равным трем, и по ударным адиабатам эмульсий близкого состава [11, 12].

Ранее в ряде работ наблюдались эффекты, которые можно интерпретировать как за

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-08-00092-а) и фонда Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (НШ-2695.2014.1).

© Сильвестров В. В., Пластинин А. В., Юношев А. С., 2016.

* Термин «АС-эмульсия» означает, что эмульсионная матрица приготовлена на основе водного раствора только аммиачной селитры, а термин «АС/НС-эмульсия» — на основе водного раствора смеси аммиачной и натриевой селитры.

пуск химической реакции за фронтом ударной волны (УВ) в эмульсии при давлении $12 \div 15$ ГПа: торможение контактной границы экран/эмульсия [9]; скачок на профиле массовой скорости АС-эмульсии с задержкой около $0.5 \div 1.0$ мкс [10]; подъем давления на границе экран/эмульсия через $0.3 \div 0.5$ мкс после входа УВ в образец как из АС/НС-, так и из АС-эмульсии [11]; скачкообразная особенность на ударной адиабате на основе АС-эмульсии [12]. Но эти особенности зарегистрированы для образцов эмульсии толщиной $5 \div 10$ мм, диаметром $60 \div 90$ мм в условиях, когда действие тыльной и боковой разгрузок исключено. Эти эффекты указывают на инициирование реакции частичного экзотермического превращения в эмульсионной матрице за фронтом достаточно сильной УВ.

Расчетные значения давления детонации эмульсионной матрицы составляют $14 \div 18$ ГПа, скорости детонации — $6.4 \div 7.5$ км/с и зависят от состава матрицы, теплового эффекта реакции и уравнений состояния продуктов взрыва [1–7]. Давление в химическом пике оценивается от 19 до 27 ГПа [3, 11, 12]. В целом, детонационные параметры для АС-эмульсии выше, чем для композиций на основе смесей селитр, так как металлические соли разлагаются за фронтом волны с поглощением энергии.

В настоящей работе анализируется поведение чистой АС-эмульсии при ударном давлении, существенно превышающем расчетные значения давления детонации, а именно при давлении, близком к результатам расчета в химическом пике. Предполагалось, что в этом случае задержка инициирования экзотермической реакции будет минимальной.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Массовый состав исследуемой АС-эмульсии: аммиачная селитра — 76.9 %, вода — 15.2, индустриальное масло И-20 — 4, парафин — 1.9, эмульгатор сорбитан моноолеат — 2 %. Компоненты эмульсии смешивались в течение 5 мин блендером со скоростью вращения около 12 000 об/мин. Плотность эмульсии 1.35 г/см³, размер капель окислителя менее 2 мкм. Выбор АС-эмульсии обусловлен тем, что в ее составе отсутствует натриевая селитра, разлагающаяся за фронтом УВ с поглощением энергии, и тем, что только на ударной адиабате АС-эмульсии наблюдалась скачкообразная

особенность. Предполагалось, что в АС-эмульсии возбудить взрывной процесс легче, чем в АС/НС-эмульсии, если это возможно в заряде ограниченного размера.

Для проверки возможности развития взрывного процесса в образцах эмульсии существенно большего размера, чем в [9–12], были поставлены эксперименты по схеме, приведенной на рис. 1. Чистая АС-эмульсия (без сенсibilизатора) массой 4.5 кг размещалась в стальной трубе внутреннего диаметра 114 мм, внешнего 121 мм, длиной 300 мм и нагружалась ударом плоской пластины из алюминия. Параметры ударников: скорость $v_p = 3.4$ км/с при толщине 8 мм, диаметре 78 мм или $v_p = 4.5$ км/с при толщине 6 мм, диаметре 50 мм. Для взрывного метания ударников использовался заряд литого ТГ 50/50 массой до 1.7 кг. Траектория УВ в эмульсии определялась с использованием резистивного датчика диаметром 0.8 мм, размещенного вдоль стенки трубы. Скорость процесса на отрезке ≈ 255 мм измерялась при помощи контактных датчиков, измерительные концы которых были размещены на оси сборки. Инструментальная погрешность измерения скорости УВ около 2 %.

Расчетные параметры соударения — скорость УВ в эмульсии u_s , амплитуда импуль-

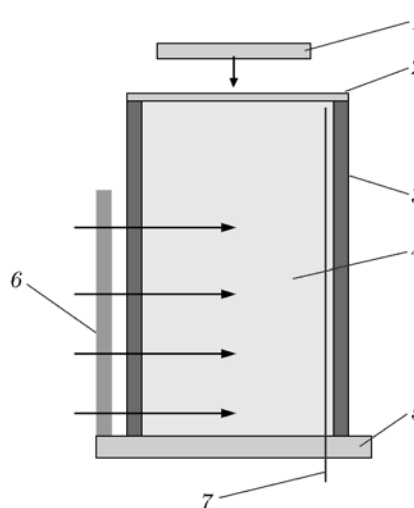


Рис. 1. Постановка эксперимента по инициированию АС-эмульсии:

1 — ударник из дюралюминия, 2 — 4-миллиметровый экран из дюралюминия, 3 — стальная труба, 4 — эмульсия, 5 — пластина-свидетель из стали толщиной 40 мм, 6 — блок контактных датчиков, 7 — резистивный датчик

са давления p_s и его длительность Δt — составляли 6.2 км/с, 21 ГПа, 1.8 мкс при $v_p = 3.4$ км/с, а при $v_p = 4.5$ км/с соответственно 7.4 км/с, 30 ГПа, 1.2 мкс. Давление соударения существенно превышало расчетное давление детонации эмульсии и для более скоростного ударника практически равнялось давлению в химическом пике [12]. Предполагалось, что УВ такой интенсивности могут инициировать без существенной задержки взрывной процесс, по крайней мере, на начальной стадии. Расчет параметров стационарной детонации чистой АС-эмульсии дал следующие значения: скорость 6.6 ÷ 7.5 км/с, давление 14 ÷ 18 ГПа [5, 7].

Результаты экспериментов приведены на рис. 2. Точками отмечены средние значения скорости УВ на интервалах, заданных координатами места установки контактных датчиков (рис. 2,а). В конце заряда скорость УВ уменьшается до 2.9 км/с, а давление за фронтом до 2 ГПа. Стальная оболочка после опыта была полностью разрушена на мелкие осколки, а пластина-свидетель осталась практически целой, хотя и была заметно деформирована, ее толщина уменьшилась до 36 ÷ 38 мм. Очевидно, что генерируемые в эмульсии ударные волны с первоначальной амплитудой 21 и 30 ГПа быстро затухают, их скорости и давление за фронтом (оценивалось по ударной адиабате АС-эмульсии [12]) значительно ниже параметров искомой детонации (диапазоны расчетных параметров детонации — скорости v_d и давления p_d — указаны вертикальными прямоугольниками на рис. 2,а), и взрывной процесс не развивается.

Для лучшего пространственного разрешения траектории УВ при $v_p = 3.4$ км/с скорость волны в образце эмульсии толщиной 60 мм измерялась при помощи четырех миниатюрных штыревых пьезоэлектрических контактных датчиков Dynasen SA-1135 диаметром 1.8 мм, размещенных эквидистантно на базе $x = 0.5 \div 60$ мм от входного экрана. Датчики для уменьшения взаимного влияния были расположены ступеньками, так что первый датчик (ближний к экрану) находился в 30 мм от оси сборки, а последний — на оси сборки. Результаты приведены на рис. 2, данные при $x = 2.7$ мм взяты из [12]. На первых 30 мм зарегистрированная скорость процесса была больше 6.0 км/с, в максимуме 6.6 ÷ 6.7 км/с на пер-

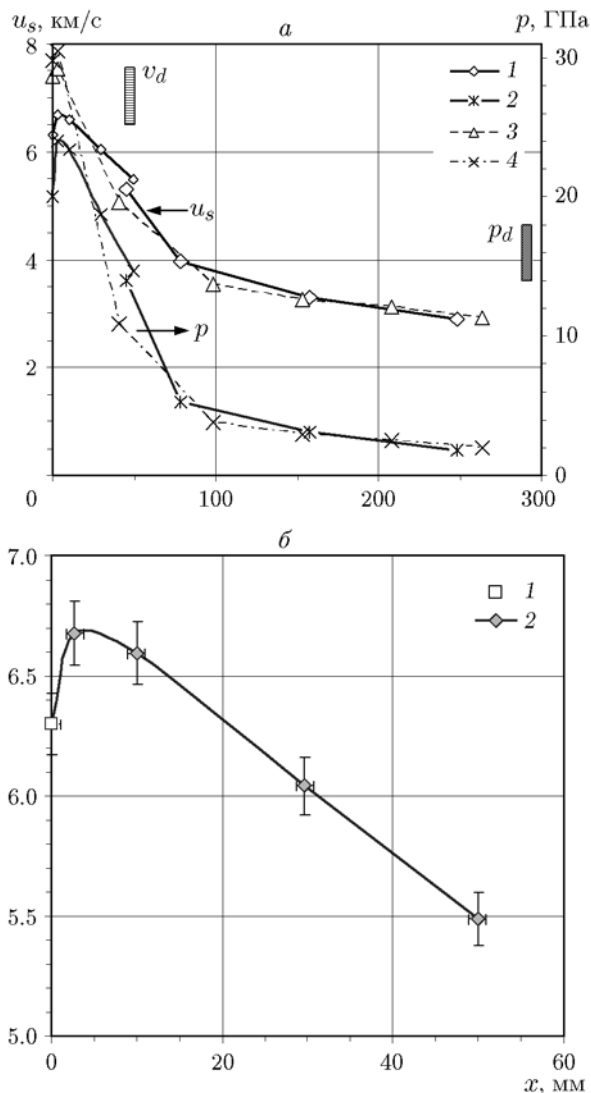


Рис. 2. Результаты инициирования эмульсии ударом пластины:

а — измерение скорости УВ контактными датчиками: 1 — $u_s(x)$, 2 — $p_s(x)$ при $v_p = 3.4$ км/с, 3 — $u_s(x)$, 4 — $p_s(x)$ при $v_p = 4.5$ км/с; б — скорость УВ на начальном участке при $v_p = 3.4$ км/с: 1 — расчетная, 2 — измеренная пьезодатчиками

вых 10 мм от экрана, что на 300 ÷ 400 м/с превышает скорость УВ, генерируемой при ударе. Наблюдаемое превышение, безусловно, связано с протеканием экзотермической реакции в эмульсии и указывает на инициирование на начальной стадии процесса экзотермической реакции, но ее развитие прекращается с приходом тыльной волны разгрузки со стороны свободной поверхности ударника.

РАСЧЕТ

С целью анализа полученных данных был выполнен двумерный расчет нагружения эмульсии ударниками в постановке, аналогичной экспериментальной, с помощью программного пакета ЭГИДА-2D [13]. При этом использовалось уравнение состояния эмульсии типа Ми — Грюнайзана, приведенное в [11]. В расчете эмульсия считалась инертным веществом, т. е. разложение эмульсии за фронтом УВ не рассматривалось. На рис. 3 представлена рассчитанная зависимость скорости УВ от пройденного расстояния при нагружении ударником со скоростью 3.4 км/с. Видно, что расчет дает заниженные значения скорости УВ по сравнению с экспериментом. На первых 30 мм разница скоростей составляет около 0.3 км/с, что объясняется разложением эмульсии с выделением энергии за фронтом мощной ударной волны [12], которое не учитывалось в расчете. Однако далее, когда скорость измеренной УВ становится меньше 4 км/с, а давление менее 10 ГПа, разница скоростей, измеренной и рассчитанной, увеличивается почти до 1 км/с. Частично это может быть связано с несовершенством уравнения состояния, по которому проведен расчет. Однако значительное количественное различие скоростей УВ в расчете и эксперименте при давлении 3 ÷ 10 ГПа свидетельствует о том, что в этом интервале давления за фронтом УВ всё ещё происходит частичное разложение эмульсии, которое, впрочем, не способно поддерживать стационарность УВ.

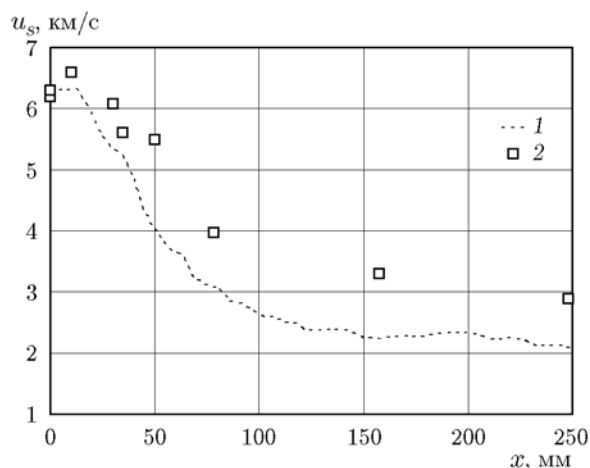


Рис. 3. Зависимость скорости ударной волны от пройденного пути:

1 — рассчитанная, 2 — измеренная

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При лабораторном масштабе эксперимента нагружение чистой АС-эмульсии плоскими УВ длительностью 1.2 ÷ 1.8 мкс и амплитудой 20 ÷ 30 ГПа, значительно превышающей расчетное давление детонации, не приводит к развитию взрывного процесса. При этом расчетные значения температуры ударного сжатия эмульсии достигают 1 300 ÷ 1 700 К [11], но этого недостаточно для полной реакции химического превращения за принудительно ограниченное время ≈ 1 ÷ 2 мкс. Конечные значения толщины ударника (определяет длительность нагружения), диаметра ударника (определяет размер области нагружения) и диаметра заряда, который, скорее всего, меньше критического диаметра детонации чистой АС-эмульсии [3], не позволяют взрывному процессу развиваться до стационарной детонации. Сформулированный вывод согласуется с результатами работ [3, 8]. Наши опыты отличались более высоким давлением нагружения, но результат тот же самый: самоподдерживающийся взрывной процесс в эмульсионной матрице не реализуется, несмотря на очень высокие параметры ударного нагружения матрицы. В то же время правильное описание подобных экспериментов, по-видимому, должно учитывать частичную реакцию вещества эмульсионной матрицы за фронтом УВ.

Как отмечалось ранее [9], основная причина неспособности эмульсионной матрицы к детонационному превращению связана с неполнотой реакции в эмульсии без сенсibilизатора, что приводит к ее низкой детонационной способности и к значительному увеличению ее критического диаметра до нелабораторного масштаба [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Yoshida M., Iida M., Tanaka K., Fudjiwara S. Detonation behavior of emulsion explosives containing glass microballoons // Proc. 8th Symp. (Intern.) on Detonation. — 1985. — P. 993–1000.
2. Tanaka K. Detonation properties of high explosives calculated by revised Kihara — Hikita equation of state // Ibid. — P. 548–557.
3. Lee J., Sandstrom F. W., Craig B. G., Persson P.-A. Detonation and shock initiation properties of emulsion explosives // Proc. 9th Symp. (Intern.) on Detonation. — 1989. — P. 263–271.
4. Cooper J., Leiper A. G., Neilson W. G. Molecular and microscopic structural effects in the

- detonation of fluid explosives // Proc. 12th Symp. (Intern.) on Detonation. — 2002. — P. 733–742.
5. **Tanaka K.** Shock compression of solid with voids by gridless Lagrangian SPH // Shock Compression of Condensed Matter — 2005; AIP Conf. Proc. — 2006. — V. 845. — Pt 2. — P. 1117–1120.
 6. **Алымова Я. В., Анников В. Э., Власов Н. Ю., Кондриков Б. Н.** Детонационные характеристики эмульсионного взрывчатого состава // Физика горения и взрыва. — 1994. — Т. 30, № 3. — С. 86–91.
 7. **Одинцов В. В., Пепекин В. И., Кутузов Б. Н.** Оценка термодинамической неидеальности детонации эмульсионного ВВ // Хим. физика. — 1994. — Т. 13, № 11. — С. 79–87.
 8. **Колганов Е. В., Смирнов С. П., Смирнов А. С., Ильин В. И., Хворов Ф. Т., Карачев А. Г.** Определение класса опасности эмульсии Порэмита // Горн. журн. — 2006. — № 5. — С. 91–92.
 9. **Ананьин А. В., Колдунов С. А.** К исследованию детонационной способности матрицы эмульсионных ВВ // IX Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. — С. 93–96.
 10. **Utkin A. V., Lavrov V. V., Mochalova V. M.** Experimental determination of detonation parameters of explosives based on ammonium nitrate // Shock Compression of Condensed Matter — 2011; AIP Conf. Proc. — 2012. — V. 1426. — P. 205–208.
 11. **Сильвестров В. В., Юношев А. С., Пластинин А. В., Рафейчик С. И.** Ударная сжимаемость эмульсионной матрицы при давлении до 37 ГПа // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 4. — С. 110–116.
 12. **Сильвестров В. В., Юношев А. С., Пластинин А. В.** Ударная адиабата эмульсионной матрицы на основе водного раствора аммиачной селитры // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 6. — С. 105–108.
 13. **Код ЭГИДА-2D** для моделирования двумерных задач: учеб. пособие / под ред. Ю. В. Янилкина. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2008.

*Поступила в редакцию 18/VI 2015 г.,
в окончательном варианте — 8/X 2015 г.*
