

УДК 534.222

ВЗРЫВНАЯ ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СЖАТИЯ

С. В. Дудин, В. А. Сосиков, С. И. Торуннов

Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка, dudinsv@icp.ac.ru

Одним из методов воздействия импульсного давления на исследуемые вещества или плазму является осесимметричное сжатие с использованием сходящейся цилиндрической детонационной волны. Такая волна часто формируется методом многоточечного инициирования, при этом она имеет ряд специфических особенностей, которые могут влиять на свойства исследуемых объектов. Для решения конкретных задач предлагается использовать взрывную лабораторную установку, в основе которой лежит сходящаяся цилиндрическая детонационная волна с количеством точек инициирования $12 \div 48$. Тротиловый эквивалент заряда менее 1 кг. Основной метод исследования — визуализация процессов с использованием отечественной высокоскоростной камеры «Наногейт», имеющей наносекундное временное разрешение. Показана структура и определена скорость сходящейся детонационной волны по радиусу. Показано, что при ограниченной толщине заряда кривизна фронта детонационной волны для различных взрывчатых веществ зависит только от расстояния до точки инициирования.

Ключевые слова: детонация, ударные волны, взрывчатое вещество, цилиндрическое сжатие, высокоскоростная съемка, гидродинамическая неустойчивость.

DOI 10.15372/FGV20190419

Исследование цилиндрического сжатия различных материалов, а также воздействие сильных сходящихся ударных волн представляет интерес как с точки зрения практического использования этих явлений, так и для решения некоторых задач теоретической физики. К таким задачам можно отнести: 1) проблему формирования и развития цилиндрической детонационной волны [1–3] при многоточечном инициировании, 2) цилиндрическое осесимметричное сжатие труб, 3) развитие неоднородностей в жидкостях при воздействии на них сходящихся цилиндрических ударных волн, 4) эжектирование мелкодисперсных частиц и плазмы с цилиндрической поверхности при выходе на нее сильной ударной волны, 5) проблему инициирования термоядерного синтеза при сжатии плазмы в магнитном поле. Полномасштабные эксперименты, в которых формируется цилиндрическая детонационная волна, являются достаточно дорогими и трудоемкими. Кроме того, для них требуется большое количество высокоэнергетического взрывчатого вещества. А это, в свою очередь, влечет необходимость проведения взрывных экспериментов на крупных взрывных площадках или полигонах.

В ИПХФ РАН разработана и широко применяется компактная лабораторная установка, в которой цилиндрическая детонационная волна формируется методом многоточечного инициирования. Масса заряда менее 1 кг в тротиловом эквиваленте позволяет использовать это устройство во взрывном куполе. Внешний вид устройства представлен на рис. 1. В верхней части показан фронтальный вид устройства, внизу — вид сбоку. Внешний диаметр сборки, где располагаются точки инициирования, 220 мм, толщина заряда 20 мм. Для формирования цилиндрической детонационной волны используется $12 \div 48$ точек инициирования с шагом $14 \div 40$ мм (поз. 1 на рис. 1). Основной заряд в виде кольца сделан из взрывчатого вещества А-IX-I (2). Между зарядом и точками инициирования расположена обойма (3), предназначенная для демпфирования взаимодействия детонационных волн от соседних точек инициирования. В центральной части находится исследуемый материал (4) в тонкостенном металлическом лайнере (5). Все точки инициируются одновременно от детонатора (6), размещенного в донной части установки.

Высокоскоростная съемка является одним из основных диагностических методов. Наряду с другими методами, она используется для кон-

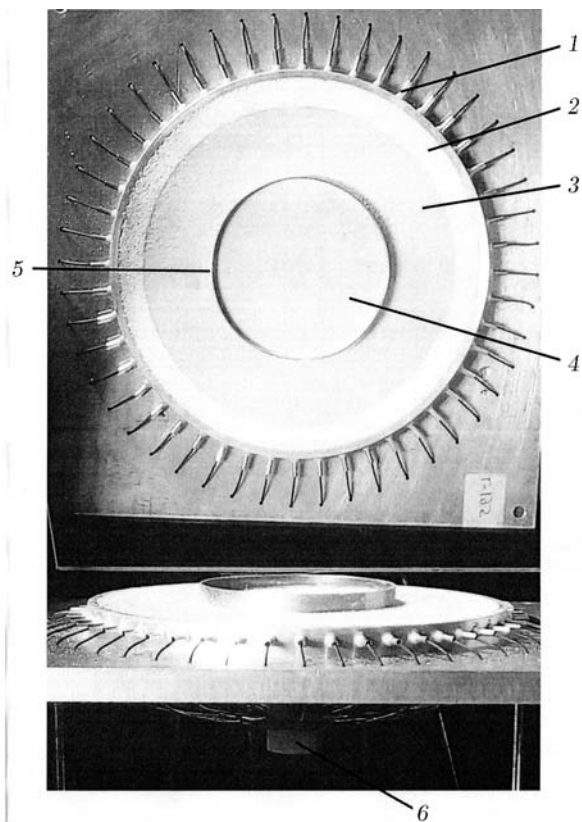


Рис. 1. Взрывная лабораторная установка:
1 — точки инициирования, 2 — основной заряд,
3 — обойма, 4 — исследуемый материал, 5 — лайнер,
6 — детонатор

троля работы устройства, т. е. визуализации процессов центростремительного движения детонационной волны и воздействия цилиндрической ударной волны на исследуемый материал. Для решения этой задачи успешно применяется отечественная камера «Наногейт-4БП». Основные характеристики камеры: четыре электронно-оптических канала; спектральный диапазон чувствительности фотокатода $380 \div 800$ н. м; рабочий диаметр фотокатода 18 мм; длительность стробирующего (затворного) импульса от 10 нс до 20 мкс; временная нестабильность (джиттер) запуска камеры менее 0.2 нс; пространственное разрешение при всех длительностях строб-импульса 30 пар лин/мм; разрешение 1380×1024 точек; объектив Nikon 70-300mm f/4.5-5.6G ED-IF AF-S VR Zoom-Nikkor.

С помощью комплекса, в состав которого входят взрывная лабораторная уста-

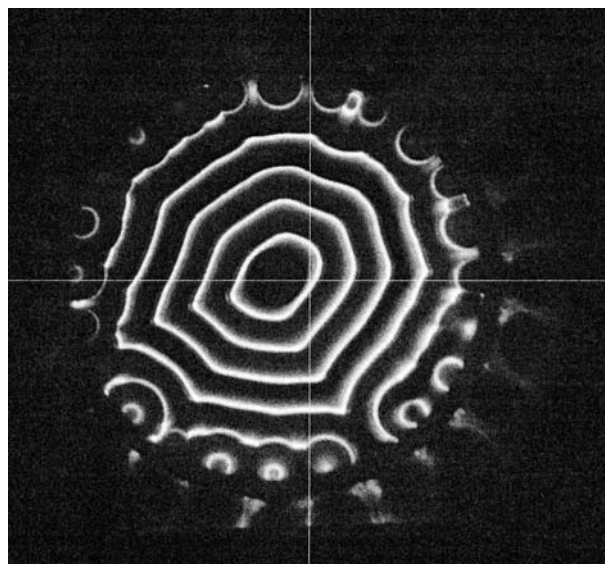


Рис. 2. Формирование цилиндрической детонационной волны методом многоточечного инициирования (последовательные положения фронта волны с интервалом 2 мкс)

новка, пульт подрыва, генератор импульсов «Stenford» и высокоскоростная камера «Наногейт-4БП», во взрывном куполе ИПХФ РАН выполнено большое количество экспериментальных исследований.

Одним из основных вопросов, возникающих при использовании данной лабораторной установки, являются стабильность сходящейся детонационной волны при многоточечном инициировании и форма волны по толщине заряда. Формирование цилиндрической детонационной волны методом многоточечного инициирования достаточно подробно рассмотрено в работах [4, 5]. На рис. 2 представлена фотография последовательных положений фронта детонационной волны с интервалом 2 мкс. Съемка выполнена камерой «Наногейт-22» с использованием программного обеспечения, позволяющего сводить несколько кадров на один снимок. В ходе эксперимента осуществлялась съемка 8 или 16 кадров с временным разрешением 3 нс. На рис. 2 можно отметить влияние разновременности срабатывания точек инициирования на форму детонационной волны и динамику ее формирования. В этом случае использовалась схема без демпфирующего кольца (поз. 3 на рис. 1) и центральной части (поз. 4 и 5), т. е. заряд был выполнен в форме сплошного диска.

Детонационная волна, сформированная методом многоточечного инициирования, име-

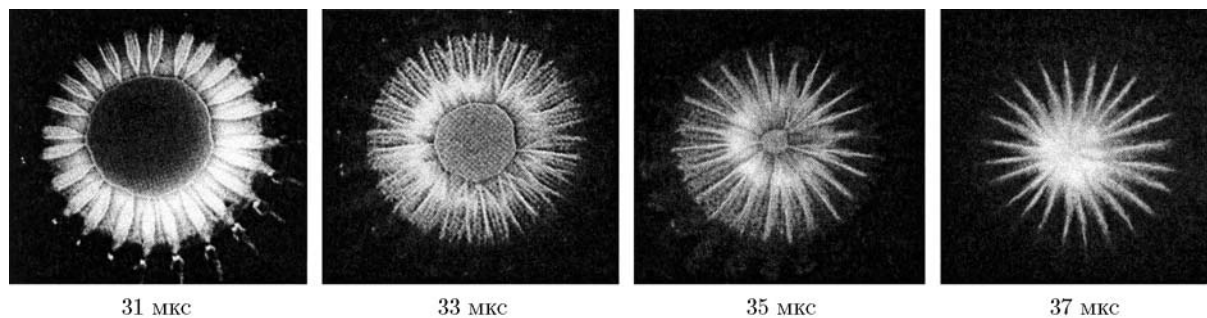


Рис. 3. Распространение цилиндрической детонационной волны в прессованном заряде

ет свои особенности, о которых говорится в работе [6]. Высокоскоростная регистрация процесса распространения цилиндрической детонационной волны в прессованном заряде показана на рис. 3. На детонационной волне явно просматриваются узлы, т. е. места сопряжения детонационных волн от соседних точек иницирования, и жгуты — светлые полосы, начинающиеся в узлах и распространяющиеся в продуктах детонации в радиальном направлении. Давление в узлах превышает давление в детонационной волне примерно в 1.3 ÷ 1.5 раза [5]. Жгуты являются следами пристенных течений продуктов детонации от участка детонационной волны между узлами. Подробно о формировании такой газодинамической структуры говорится в работе [7]. Узлы и жгуты образуют объемно-ячеистую структуру течения. Такая структура цилиндрической волны обуславливает гидродинамическую неустойчивость в сжимаемых образцах. Газодинамическая картина течения продуктов детонации сохраняется до полного сжатия (37 мкс).

Распространение цилиндрической детонационной волны к центру заряда является процессом нестационарным. Как показывают расчеты при моделировании цилиндрической детонации [5] и экспериментальные исследования, проведенные авторами, скорость детонационной волны D возрастает по мере приближения к центру (рис. 4). Для подтверждения этих предположений были проведены эксперименты со щелевой регистрацией цилиндрического детонационного фронта высокоскоростной камерой ВФУ (рис. 5). Щель располагалась в верхней части заряда, от точек иницирования к центру сборки.

Всю развертку можно разделить на три участка (см. рис. 5). Первый от 0 до t_1 , это со-

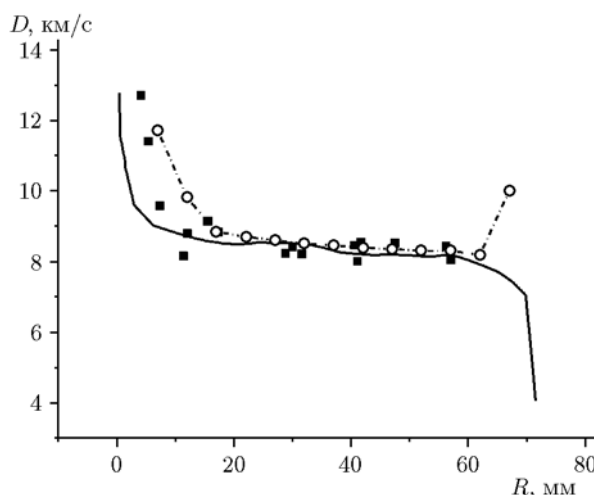


Рис. 4. Скорость детонационной волны при движении к центру (0) прессованного заряда из А-IX-I:

линия — расчет, квадраты — эксперимент с покадровой съемкой, кружки — обработка щелевой развертки

ответствует радиусу от 75 до 60 мм на рис. 4. На этом участке происходит иницирование внешней поверхности заряда. Детонационные волны от соседних точек иницирования взаимодействуют между собой и идет формирование цилиндрической детонационной волны. Второй участок от t_1 до t_2 , на рис. 4 это радиус от 60 до 12 мм. На этом участке наблюдается небольшое нарастание скорости детонации. Третий участок от t_2 до t_3 , на рис. 4 он соответствует радиусу от 12 мм до 0. Скорость детонации здесь резко возрастает к центру заряда (t_3). Для более точной ее регистрации на этом участке требуются специальные эксперименты. Качественная оценка скорости детонации по щелевой развертке согласуется с

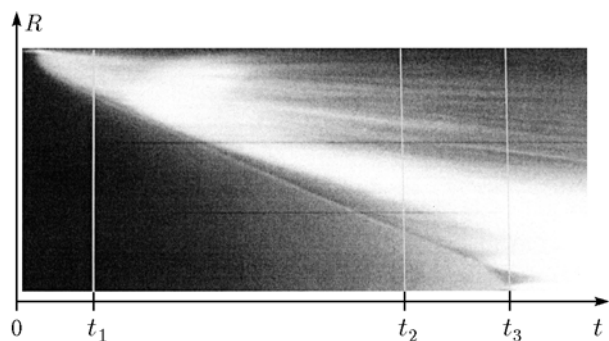


Рис. 5. Щелевая развертка цилиндрической детонационной волны при взрыве прессованного заряда из А-IX-I

расчетными значениями и экспериментальными данными, полученными при обработке покадровой съемки.

Что касается формы волны по толщине заряда, то для выяснения этого вопроса были проведены специальные эксперименты. Поскольку заряд представляет собой цилиндрическую пашку диаметром ≈ 200 мм и толщиной ≈ 20 мм, многоточечное инициирование было смоделировано в плоской постановке для заряда толщиной 20 мм, что позволило значительно снизить массу взрывчатого вещества (ВВ). При этом проводилась высокоскоростная съемка выхода детонационной волны на прозрачную боковую стенку и движения волны вдоль этой стенки. На рис. 6 показана динамика изменения детонационного фронта по толщине насыпного заряда. В момент времени 29 мкс фронт находится примерно в 25 мм от точки инициирования, при $t = 32$ мкс на удалении 43 мм, при $t = 39$ мкс — 85 мм. Можно отметить, что кривизна фронта определяется только расстоянием от точки инициирования, т. е. кривизна уменьшается при увеличении расстояния. Разгрузочных эффектов на границе с воздухом (сверху) и с металлической подложкой

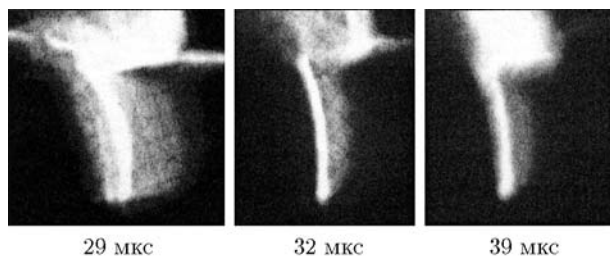


Рис. 6. Детонационный фронт по толщине насыпного заряда

(снизу) не наблюдается.

Особый интерес представляет инициирование цилиндрической детонации в жидком ВВ. Для экспериментального исследования этого процесса использовалась отработанная лабораторная установка с многоточечным инициированием, в центральной части которой соосно с зарядом устанавливалась кювета (на место лайнера 5, см. рис. 1), представляющая собой тонкостенный медный цилиндр. Диаметр кюветы 90 мм. Кювета заполнялась жидким ВВ (поз. 4 на рис. 1) до уровня толщины основного заряда. На рис. 7 показано инициирование цилиндрической детонационной волны в жидком ВВ. В момент времени 41 мкс цилиндрическая детонационная волна основного заряда подходит к кювете, а при $t = 49$ мкс уже наблюдается детонационная волна в жидком ВВ. Следует отметить, что детонационная волна, сформированная методом многоточечного инициирования, проходя по основному заряду и через стенки медной кюветы, сохраняет свою первоначальную объемно-ячеистую газодинамическую структуру, которая наблюдается при ее движении по жидкому ВВ.

С помощью представленной в данной работе лабораторной установки, в которой цилиндрическая детонационная волна формируется методом многоточечного инициирования, проведены экспериментальные исследования динамики сжатия тонкостенного металлического лайнера [8], а также исследован выход сильной ударной волны на свободную цилиндрическую поверхность и эжекция микрочастиц и плазмы в сжимаемую область [9].

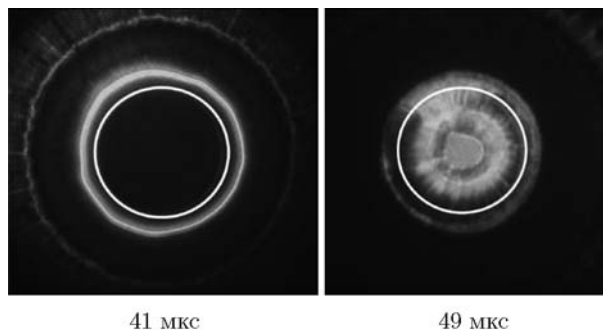


Рис. 7. Инициирование жидкого взрывчатого вещества цилиндрической ударной волной:

41 мкс — подход ударной волны к кювете с жидким ВВ, 49 мкс — детонационная волна в жидком ВВ; положение кюветы определяется окружностью

Созданная взрывная лабораторная установка хорошо зарекомендовала себя при исследовании отдельных практических проблем цилиндрического сжатия образцов, воздействия сходящейся цилиндрической ударной волны на тонкостенные лайнеры, генерации высоких давлений, сжатия магнитного поля и многих других процессов. При проведении экспериментальных исследований с использованием этой установки необходимо иметь в виду ряд особенностей, которыми отличается цилиндрическая детонация, формируемая методом многоточечного инициирования. Среди таких особенностей необходимо отметить объемно-ячеистый характер газодинамики течения и детонационной волны, что может стать причиной гидродинамических неустойчивостей в исследуемых сжимаемых образцах. Показано, что схождение детонационной волны к оси является нестационарным процессом. Скорость сходящейся детонационной волны возрастает при движении к центру. Особенно резкий скачок наблюдается в центральной части около оси. Экспериментально показано, что на представленной лабораторной установке детонационная волна по толщине заряда не имеет заметной разгрузки на границах с воздухом и подложкой. Для успешного осуществления крупномасштабных проектов, где используется цилиндрическое, коническое или сферическое сжатие, необходимо иметь в виду объемно-ячеистую структуру течения при формировании волны методом многоточечного инициирования. Основную задачу можно разбить на ряд более мелких, которые можно решать на представленной лабораторной установке. Этот путь наиболее экономичный и рациональный.

Все эксперименты проведены с использованием приборной базы Московского регионального взрывного центра коллективного пользования ИПХФ РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б. Сходящаяся цилиндрическая детонационная волна // ЖЭТФ. — 1959. — С. 782–792.
2. Альтшулер Л. В., Кормер С. Б., Баканова А. А., Петрунин А. П., Фунтиков А. И., Губкин А. А. Нерегулярные режимы косоугольного столкновения ударных волн в твердых телах // ЖЭТФ. — 1961. — Т. 41, вып. 5 (11). — С. 1382–1393.
3. **Computation of the Flow behind Converging Detonation Wave in Cylindrical or Spherical Geometry** / L. Guerri, A. Taroni (Eds). — Euratom Rep «Eur 1848e», 1964.
4. **Dudin S. V., Sosikov V. A., Torunov S. I.** Experimental investigation of cylindrical detonation wave // J. Phys. Conf. Ser. — 2016. — V. 774. — 012074.
5. **Shutov A. V., Sultanov V. G., Dudin S. V.** Mathematical modeling of converging detonation waves at multipoint initiation // J. Phys. Conf. Ser. — 2016. — V. 774. — 012075.
6. **Dudin S. V., Sosikov V. A., Torunov S. I.** Formation features of cylindrical detonation wave at multipoint initiation // J. Phys. Conf. Ser. — 2018. — V. 946. — 012057.
7. **Иногамов Н. А., Опарин А. М.** О трехмерных сетчатых структурах, связанных с неустойчивостями Рихтмайера — Мешкова и Рэлея — Тейлора // ЖЭТФ. — 1999. — Т. 116, № 3. — С. 908–939.
8. **Dudin S. V., Sosikov V. A., Torunov S. I.** The output of a shock wave on the inner surface of a cylindrical liner // J. Phys. Conf. Ser. — 2018. — V. 1147. — 012026.
9. **Kulish M. I., Dudin S. V.** Microparticles and plasma stream registration during cylinder compression of a metal liner // J. Phys. Conf. Ser. — 2018. — V. 1147. — 012025.

Поступила в редакцию 01.10.2018.

После доработки 24.12.2018.

Принята к публикации 20.02.2019.