

УДК 533.9.08

## КОМПАКТНОЕ ВЗРЫВНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ РАЗГОНА АЛЮМИНИЕВЫХ УДАРНИКОВ ДО СКОРОСТИ 3 км/с

© 2011 г. В. В. Якушев, А. В. Уткин, С. А. Колдунов, М. И. Кулиш

*Институт проблем химической физики РАН*

*Россия, 142432, Черноголовка Московской обл., просп. Академика Семенова, 1*

*E-mail: yakushev@icp.ac.ru*

Поступила в редакцию 20.10.2010 г.

Методами фоторегистрации в покадровом режиме (CCD-камера) и режиме щелевой развертки исследованы характеристики компактного генератора плоской ударной волны. На его основе разработана пушка для метания со скоростью до 3 км/с алюминиевых ударников диаметром 20 мм и толщиной 2 мм.

Необходимость разработки взрывных металлических устройств с малой массой заряда (несколько десятков грамм), не уступающих по своим характеристикам традиционно используемым [1], обусловлена применением в лабораторных условиях небольших бронекламер в составе установок для исследования ударно-волновых и детонационных процессов, например, методом с использованием синхротронного излучения [2] или протонной радиографии [3]. Небольшие размеры бронекламеры накладывают ограничения на максимально допустимую массу закладываемого в нее заряда взрывчатого вещества (в.в.). Модель малогабаритного генератора плоской ударной волны с массой заряда не более 10 г была разработана ранее [2] для исследования аэрогеля на установке синхротронного излучения с взрывной камерой малых габаритов. На базе этого генератора была разработана пушка для метания небольших алюминиевых ударников. При проектировании плосковолнового генератора использовалась типичная схема (рис. 1) [1]: внешний конический заряд в.в. (пластит), подрываемый с вершины, и внутренняя коническая вставка из инертного материала — плексигласа, из основания которой выходила плоская ударная волна. Корпус генератора был также выполнен из плексигласа. В пушке, разработанной на основе генератора, инициировалась таблетка в.в. (смесь тротил/гексоген 50/50), продукты взрыва которой разгоняли до скоростей  $\leq 2$  км/с небольшие алюминиевые ударники  $\varnothing 20$  мм, запрессованные в стальные кольца. Масса заряда в.в. в пушке не превышала 20 г.

Цель данной работы — детальное исследование описанного в работе [2] генератора плоской ударной волны и создание на его основе пушки для разгона ударников в широком диапазоне скоростей с использованием более мощного в.в. — флегматизированного гексогена.

В первой серии экспериментов были исследованы свойства самого генератора. В качестве в.в. использовался пластит на основе гексогена с параметрами: средняя скорость детонации 7.5 км/с, средняя плотность 1.53 г/см<sup>3</sup>. Для определения размеров плоского участка ударной волны на выходе из генератора использовался скоростной фоторегистратор (с.ф.р.) На торец генератора  $\varnothing 20$  мм насыпали тонкий слой гексогена толщиной 250 мкм и прижимали оргстеклом. При выходе ударной волны на торец генератора гексоген вспыхивал, и свечение через объектив направлялось на щель фоторегистратора. Щелью шириной 100 мкм вырезалась область свечения на диаметре торца генератора. Развертка изображения щели осуществлялась на пленку с помощью быстро вращающегося зеркала. Скорость движения изображения щели по пленке составляла 3 мм/мкс. Результат эксперимента, приведенный на рис. 2, показал, что на выходе из генератора фронт ударной волны не является плоским. (Движение изображения щели по пленке на рис. 2 происходит слева направо.)

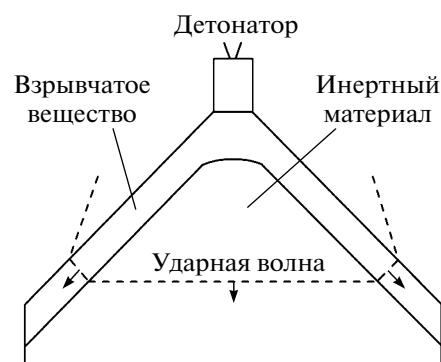
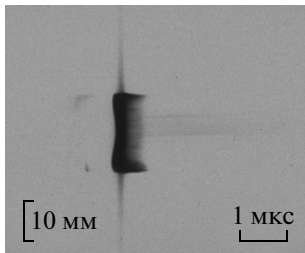
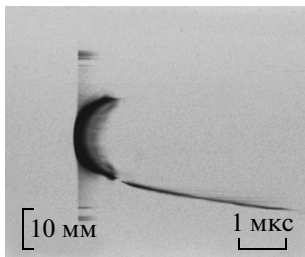


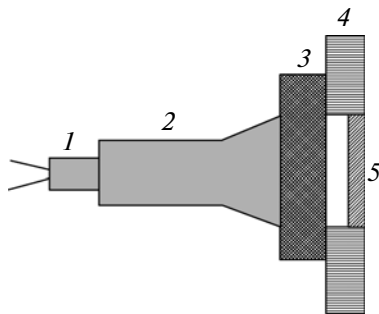
Рис. 1. Схема плосковолнового генератора ударной волны.



**Рис. 2.** Фотохронограмма выхода ударной волны на торец генератора.



**Рис. 3.** Метание ударника плосковолновым генератором. Фотохронограмма выхода ударной волны из экрана.



**Рис. 4.** Пушка для разгона алюминиевых ударников. 1 – детонатор, 2 – генератор плоской ударной волны, 3 – таблетка в.в., 4 – стальное кольцо, 5 – алюминиевый ударник.

Анализ рис. 2 показывает, что ударная волна сначала выходит на края генератора, а затем достигает центра. Запаздывание свечения в центре относительно краев составляет  $\sim 0.2$  мкс. Так как скорость ударной волны в конусной вставке генератора перед выходом в гексоген находится в диапазоне 3–4 км/с, то центр волны отстает от краев на 0.6–0.8 мм при диаметре фронта волны 20 мм. Искривление фронта может быть связано с отличием в.в., используемых в работе [2] и в наших экспериментах.

Необходимо отметить, что для разгона ударников принципиальное значение имеет не только форма выходящей из генератора ударной волны, но и распределение давления по радиусу, а также

его спад во времени. Поэтому форма ударника, разогнанного данным генератором, может принципиально отличаться от приведенной на рис. 2.

Для исследования характеристик метания был проведен эксперимент, в котором алюминиевый ударник метался непосредственно плосковолновым генератором. Следует отметить, что при разгоне ударник не отрывался от генератора, а двигался вместе с конусной вставкой из-за более низкого динамического импеданса плексигласа. Ударник толщиной 1 мм и диаметром 20 мм разогнался на базе полета 2 мм и ударял по алюминиевому экрану толщиной 1 мм, на который был насыпан тонкий слой гексогена. Фотохронограмма выхода ударной волны из экрана представлена на рис. 3. Видно, что, несмотря на вогнутый профиль ударной волны на выходе из генератора (рис. 2), ударник приобретает выпуклую форму – его центр опережает края (см. рис. 3). Это ожидаемый результат, поскольку при совместном движении ударника с конусной вставкой давление в центре ударника из-за боковой разгрузки спадает значительно позже, чем на краях, и он выгибается вперед. Таким образом, даже на базе полета 2 мм ударник успевает заметно деформироваться, что делает его непригодным для формирования одномерных ударно-волновых течений в исследуемых образцах. Выгибанием ударника можно было бы пренебречь, если бы размеры генератора вместе с ударником были существенно больше, а область нагружения осталась такой же.

Для использования генератора в составе пушки для метания ударников был разработан вариант конструкции (рис. 4), в которой по сравнению с [2] был уменьшен зазор между таблеткой в.в. и ударником, а также увеличен диаметр таблетки в.в. до 30 мм с одновременным уменьшением ее высоты до 8 мм. Все эти меры должны были привести к более равномерному разгону ударника с сохранением его плоскостности, учитывая использование более мощного в.в. – флегматизированного гексогена. В эксперименте плосковолновой генератор 2 инициировал волну детонации в таблетке в.в. 3. Продукты взрыва разгоняли алюминиевый ударник 5 толщиной 2 мм, запрессованный в стальное кольцо 4 толщиной 5 мм. Между таблеткой и ударником оставался воздушный зазор 3 мм. Ударник разогнался на базе 2 мм и ударял по Al-экрану толщиной 2 мм, на который был насыпан тонкий слой гексогена.

Результат эксперимента показан на рис. 5а. Видно, что центр ударника, как и в случае его метания генератором, опережает края. Неожиданной оказалась “заостренность” центральной области. Чтобы понять причину этого явления, был проведен дополнительный эксперимент с целью определения формы детонационного фронта на выходе из таблетки в.в.

В эксперименте генератор инициировал детонационную волну в таблетке в.в. Фронт волны

выходил на ее поверхность, свечение регистрировалось с.ф.р. На торец таблетки для однотипности экспериментов был насыпан тонкий слой гексогена. Фотохронограмма процесса приведена на рис. 5б.

Анализ рис. 5б показывает, что по сравнению с рис. 2 теперь отстает не только центр, но и края, а впереди идет срединная кольцевая область. Следует отметить, что в данном эксперименте использовалась таблетка в.в., диаметр которой (30 мм) в полтора раза превышал диаметр рабочей области генератора (20 мм), результат эксперимента с которым приведен на рис. 2. Поэтому на рис. 5б ширина фронта также в полтора раза больше, чем на рис. 2 (масштаб рисунков по вертикали несколько отличается). При наложении двух фотохронограмм друг на друга их центральные вогнутые части практически совпадают, совпадают также опережающие края фронта на рис. 2 с опережающей средней частью на рис. 5б. Отличие рисунков проявляется лишь в наличии отстающих краев на рис. 5б, что обусловлено большим диаметром таблетки по сравнению с рабочей областью генератора. Таким образом, форма фронта ударной волны на выходе из генератора практически не меняется по мере распространения по таблетке в.в. при данной ее толщине. При этом форма волны с вогнутым центром приводит к формированию кумулятивной струи из продуктов взрыва в воздушном зазоре перед ударником. Это и приводит к его выгибанию в центре, что наблюдается на рис. 5а.

Таким образом, для обеспечения плоскостности метаемых ударников необходимо внести изменения в конструкцию генератора с целью получения на его выходе плоского фронта ударной волны.

Отставание ударной волны в центре связано с ее относительно медленным распространением по конической вставке. Поэтому простейший способ “выравнивания” плоскости волны состоит в изменении раствора конуса вставки. Раствор конуса был увеличен с  $90^\circ$  до  $140^\circ$ . В результате проведенной модернизации удалось получить на выходе из генератора практически плоскую ударную волну. Результат одного из экспериментов, выполненного в постановке, аналогичной рис. 2, приведен на рис. 6.

После того как плоскостность фронта ударной волны на выходе из генератора удалось улучшить, были проведены испытания пушки (см. рис. 4). Полет ударника снимался CCD-камерой “COR-DIN”, позволяющей регистрировать процессы субмикросекундной длительности. Экспозиция кадра составляла 5 нс, поэтому для освещения объекта использовалась мощная взрывная аргоновая подсветка. Схема экспериментов приведена на рис. 7. Пластиковая трубка 8 диаметром 40 мм заполнялась аргоном. С одной стороны трубки помещался заряд в.в., а с другой — тонкая прозрачная пленка

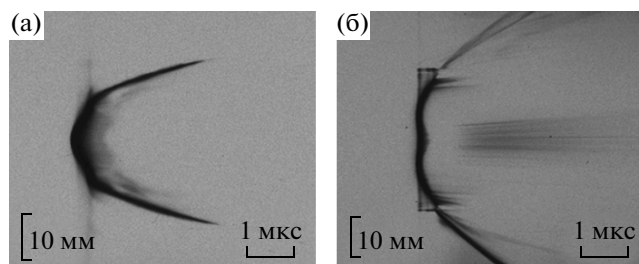


Рис. 5. Метание ударника продуктами взрыва таблетки в.в. Фотохронограммы выхода ударной волны из экрана (а) и выхода детонационной волны из таблетки в.в. (б).

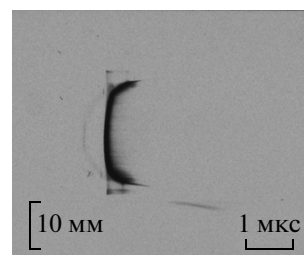


Рис. 6. Фотохронограмма выхода ударной волны на торец генератора.

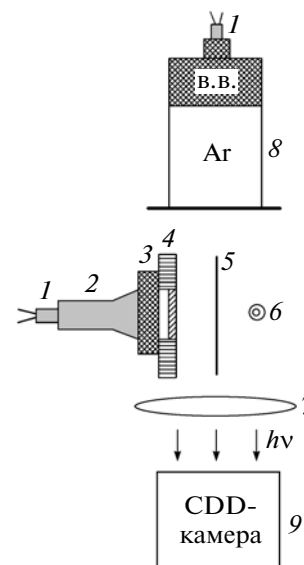
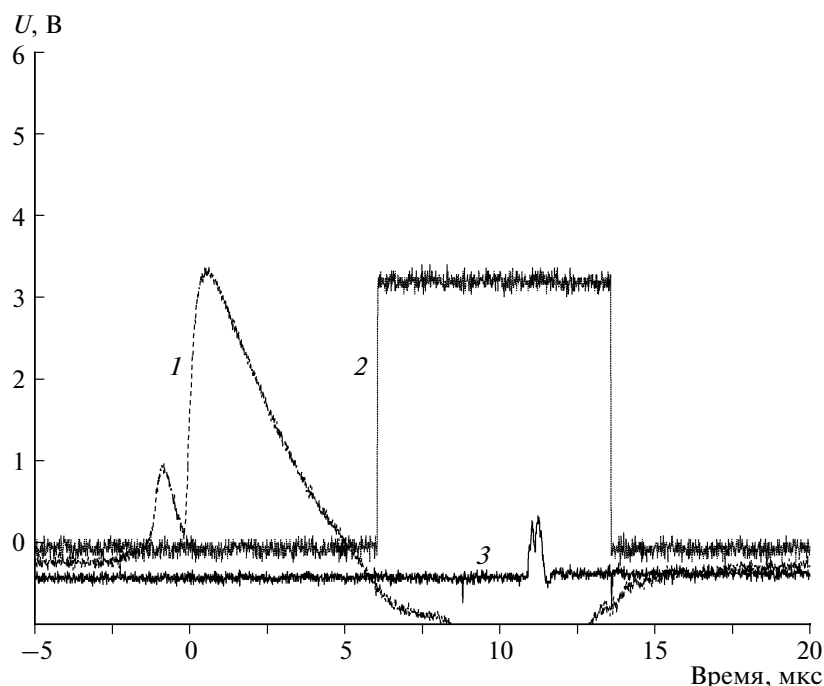


Рис. 7. Схема эксперимента (вид сверху). 1 — детонаторы; 2 — генератор плоской ударной волны; 3 — таблетка метаемого в.в.; 4 — стальное кольцо с впрессованным в него Al-ударником; 5 — Al-фольга; 6 — винт; 7 — линза; 8 — взрывная аргоновая подсветка; 9 — CCD-камера.

для выхода излучения. Свечение возникало при распространении ударной волны по аргону. Камера позволяла производить до 8 кадров за одну съемку.



**Рис. 8.** Осциллограммы срабатывания датчиков, регистрирующих: 1 — момент подачи импульса тока на детонатор; 2 — сигнал с камеры о начале ее работы после срабатывания запуска; 3 — момент столкновения ударника с преградой из фольги.

В данной постановке эксперимента ударник разгонялся на базе 10 мм и сталкивался с преградой из фольги 5 толщиной 400 мкм. Для подрыва использовались детонаторы, срабатывающие от импульса высокого напряжения. Время срабатывания детонаторов составляло  $\sim 0.1$  мкс, что позволило синхронизировать процесс метания ударника с аргонной подсветкой.

Основные моменты в эксперименте регистрировались датчиками, подключенными к осциллографу. Так, момент подачи тока на детонатор регистрировался с помощью пояса Роговского, который размещался вокруг линии подрыва, а момент столкновения ударника с преградой (фольгой) — с помощью контактного датчика, закрепленного на преграде. Запуск камеры на съемку осуществлялся по сигналу со второго контактного датчика, установленного на таблетке в.в., который замыкался продуктами взрыва и через  $RC$ -цепочку выдавал сигнал на запуск камеры. Одновременно камера выдавала сигнал на осциллограф о начале съемки. Осциллограммы срабатывания датчиков приведены на рис. 8.

Таким образом, были определены моменты подачи тока на подрыв детонатора, начала детонации таблетки в.в. и столкновения ударника с преградой из фольги. Время от момента подачи тока на детонатор до столкновения ударника с фольгой составило 13 мкс. Это время определялось с целью последующей синхронизации момента попадания ударника в кадр с моментом на-

чала съемки его полета в планируемых экспериментах на протонорадиографической установке. Сложность эксперимента состоит в том, чтобы обеспечить синхронизацию момента запуска камеры на съемку с сигналом от протонного ускорителя о приходе пучка.

Кадры, на которых зарегистрирован разгон ударника, приведены на рис. 9. Диаметр и толщина Al-ударника составляли 20 и 2 мм соответственно. Тонкая вертикальная полоса в центральной части кадров представляет собой снятое с торца изображение преграды из фольги. Справа от фольги расположен винт для удобства наведения на резкость во время настройки. Окно аргонной подсветки расположено сзади. Ударник движется слева направо.

Первый кадр (рис. 9а) сделан с опозданием, здесь видны продукты взрыва, обтекающие ударник по периметру и движущиеся впереди него. Несмотря на мощную подсветку, продукты не удается просветить — их плотность достаточно велика.

На рис. 9б, 9в видно, как продукты подлетают к преграде и тормозятся на ней. Рисунок 9г демонстрирует столкновение ударника с преградой и начальное движение фольги. Диаметр плоской части составляет 13 мм при диаметре самого ударника 20 мм, что является хорошим результатом на базе разгона 10 мм.

Из данных эксперимента не представляется возможным точно определить скорость ударника. Можно сделать лишь предварительные оценки.

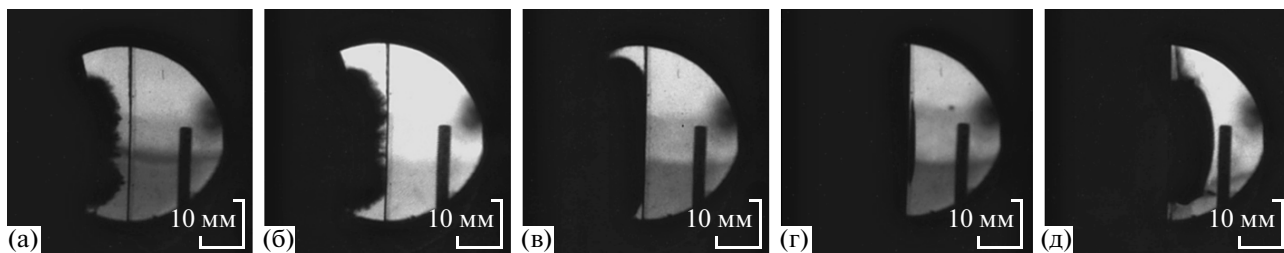


Рис. 9. Фотографии процесса метания ударника, сделанные в следующие моменты времени после начала детонации таблетки в.в.: 2.5 мкс (а), 3.5 мкс (б), 4.5 мкс (в), 5.5 мкс (г), 8.0 мкс (д).

Если предположить, что ударник разгоняется мгновенно, то его скорость должна быть не менее 3 км/с.

На рис. 9д видно последующее движение ударника вместе с преградой. Плоская часть начинает искривляться. Чем большее расстояние пролетает ударник, тем больше теряется его плоскостность. Так как в данной пушке планируется использовать базы полета  $\leq 10$  мм для разгона ударника перед столкновением с экраном, то диаметр плоской части на таких базах будет близок к диаметру самого ударника. Окончательно это будет установлено в экспериментах по метанию ударника с регистрацией его полета на протонорадиографической установке.

Таким образом, в рамках данной работы были проведены исследования формы фронта ударной волны, создаваемой генератором [2], и возможности применения последнего для метания ударников с использованием пластита с указанными

выше характеристиками. В результате модернизации была получена ударная волна с плоским фронтом на выходе из генератора. На базе данного генератора разработана пушка для метания Al-ударников диаметром 20 мм и толщиной 2 мм со скоростью до 3 км/с.

Работа выполнена в рамках Госконтракта № Н.4е.45.03.10.1016.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортков В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996.
2. Merzhievsky L.A., Bespalov E.V., Efremov V.P. et al. // Nucl. Instrum. and Methods in Physics Research Section A. 2009. V. 603. P. 164.
3. Голубев А.А., Демидов В.С., Демидова Е.В. и др. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 4. С. 61.