

Кривая на рис. 3 отделяет область состояний, где зафиксирована полная или частичная детонация, от области состояний, в которой детонация не возникает¹. Положение этой кривой в известной мере условно, так как вблизи предела возникновения детонации ее возбуждение носит, по-видимому, вероятностный характер.

Совокупность экспериментальных данных свидетельствует о том, что процесс возбуждения детонации импульсной нагрузкой зависит не только от амплитуды действующего давления, но также и от времени действия этой нагрузки. Особенно ярко временная зависимость проявляется в области кратковременных импульсов давления. Напротив, при длительных временах действия импульсной нагрузки величина $p_{фр}$, при которой возбуждается детонация, сравнительно слабо зависит от времени приложения нагрузки. Вследствие этого при больших временах действия импульса оправданным является выбор в качестве критерия возникновения детонации значения прикладываемого к поверхности ВВ давления вне его связи со временем действия, как это часто встречается в литературе.

Полученные экспериментальные данные качественно согласуются с расчетными результатами для гомогенного жидкого ВВ работы [6], в которой отмечается быстрое возрастание времени индукции при крутом спаде давления за фронтом ударной волны и весьма слабая зависимость при пологом спаде.

Поступила в редакцию
14/IV 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. К. Юхансон, П. Персон. Детонация взрывчатых веществ. М., «Мир», 1973.
2. А. Н. Дремин, С. Д. Савров и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М., «Наука», 1970.
3. Ф. А. Баум, Л. П. Орленко и др. Физика взрыва. М., «Наука», 1975.
4. Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев. Иницирование твердых взрывчатых веществ ударом. М., «Наука», 1968.
5. С. Н. Буравова, А. Н. Дремин. ФГВ, 1971, 7, 1.
6. А. В. Дубовик, В. К. Боболев. Докл. АН СССР. 1975, 222, 3.
7. Compendium of Shock Data. Univ. of California, 1966.
8. N. L. Coleburn, T. P. Liddiard. J. Chem. Phys., 1966, 44, 1929.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ЗАХЛОПЫВАНИЯ КАНАЛА В ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ И ДВУМЕРНЫХ РАСЧЕТАХ

С. М. Бахрах, Л. Я. Игнатова, Б. А. Клопов, Е. Е. Мешков,
В. Н. Мохов, А. В. Певницкий, В. А. Сараев,
В. П. Севастьянов, В. И. Тарасов

При взрыве заряда в длинной трубе, окруженной грунтом, может произойти перекрытие канала вблизи места заложения заряда. Захлопывание канала происходит после истечения части продуктов взрыва под действием давления за фронтом ударной волны, идущей по грунту. Для детального изучения этого явления были проведены лабораторные эксперименты и численные расчеты.

¹ Положение границы областей частичной и полной детонации не определялось.

Эксперимент	Источник энергии	Окружающая среда	Вещество в канале
Модель I	ТГ 25/75 $\rho_0=1,72$ $\epsilon_0=16,7 \cdot 10^{10}$	Вода $\rho_0=1$ $\epsilon_0=0$	Аргон $\rho_0=0,00212$ $\epsilon_0=0$ $\Gamma=0,31$
Модель II	$C_2H_2+2,5O_2$ $\rho_0=13,7 \cdot 10^{-4}$ $\epsilon_0=12,3 \cdot 10^{10}$ $\Gamma=0,136$	Фреон-12 $\rho_0=51,3 \cdot 10^{-4}$ $\epsilon_0=0,14 \cdot 10^{10}$ $\Gamma=0,139$	Водород $\rho_0=0,85 \cdot 10^{-4}$ $\epsilon_0=2,94 \cdot 10^{10}$ $\Gamma=0,4$
«Marvel»	Ядерный взрыв $\rho_0=1,3$ $\epsilon_0=5,84 \cdot 10^{13}$	Аллювий $\rho_0=1,75$ $\epsilon_0=0$	Воздух $\rho_0=0,0011$ $\epsilon_0=0$

Примечание. ρ [г/см³], ϵ [Эрг/г].

Экспериментальное исследование эффекта захлопывания проводилось в двух сериях опытов (модель I и II). Параметры веществ приведены в таблице (данные взяты из работ [1—3]). Там же приводятся параметры эксперимента «Marvel» [4, 5] с ядерным источником энергии.

В модели I использован ТГ 25/75 (смесь тротила с гексогеном). Цилиндрик ВВ помещался в канал из лавсановой пленки толщиной 10 мкм, в остальной части канала, заполненной аргоном, создавалось избыточное давление 0,1 атм. Такая сборка помещалась в аквариум, наполненный водой. Инициирование ВВ осуществлялось с помощью электродетонатора. Картина течения регистрировалась камерой СФР-2М в режиме лупы времени, при этом использовалась взрывная подсветка.

В модели II в качестве источника энергии использовалась детонирующая газовая смесь. Наиболее удобной оказалась стехиометрическая смесь ацетилена с кислородом $C_2H_2+2,5O_2$. Модели канала и заряда имели следующее устройство: на каркасе, спаянном из тонкой стальной проволоки ($\varnothing 0,5$ мм), натягивалась и наклеивалась тонкая органическая пленка (толщина $\sim 0,4$ мкм), образуя замкнутый объем. Модели заряда и канала устанавливались в заполненной фреоном-12 камере кубической формы, две стенки которой были выполнены из оптического стекла. Детали, касающиеся техники изготовления пленок и заполнения модели рабочими газами, изложены в [6]. Газовая смесь подрывалась пробоем искрового зазора (~ 3 мм) от конденсатора емкостью 1 мкФ с рабочим напряжением 10 кВ. Картина течения регистрировалась тeneвым прибором ИАБ-451, сочлененным оптически с камерой СФР-2М в варианте лупы времени по методу [7].

Во всех проведенных экспериментах наблюдался эффект захлопывания канала вблизи взрывного источника энергии. Эксперименты, проведенные для разных соотношений длины заряда L к диаметру d , показали, что, начиная с $L/d > 2$, эффект захлопывания не зависит от длины заряда. Типичные фотохронограммы опытов приведены на рис. 1—3 ($L=80$ мм, $d=20$ мм), где хорошо виден процесс захлопывания канала.

Двумерные расчеты захлопывания канала проводились по методике [8], использующей в существенной части метод, изложенный в работе [9]. При проведении данных расчетов использовались возможности методики [8], связанные с разбиением системы на отдельные счетные области и использованием подвижных сеток. При этом границы счетных областей являются лагранжевыми линиями, а в остальных точках сетка может перестраиваться по каждому направ-

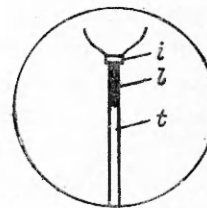


Рис. 1. Начальная геометрия опыта.
 t — канал; l — заряд;
 i — детонатор.

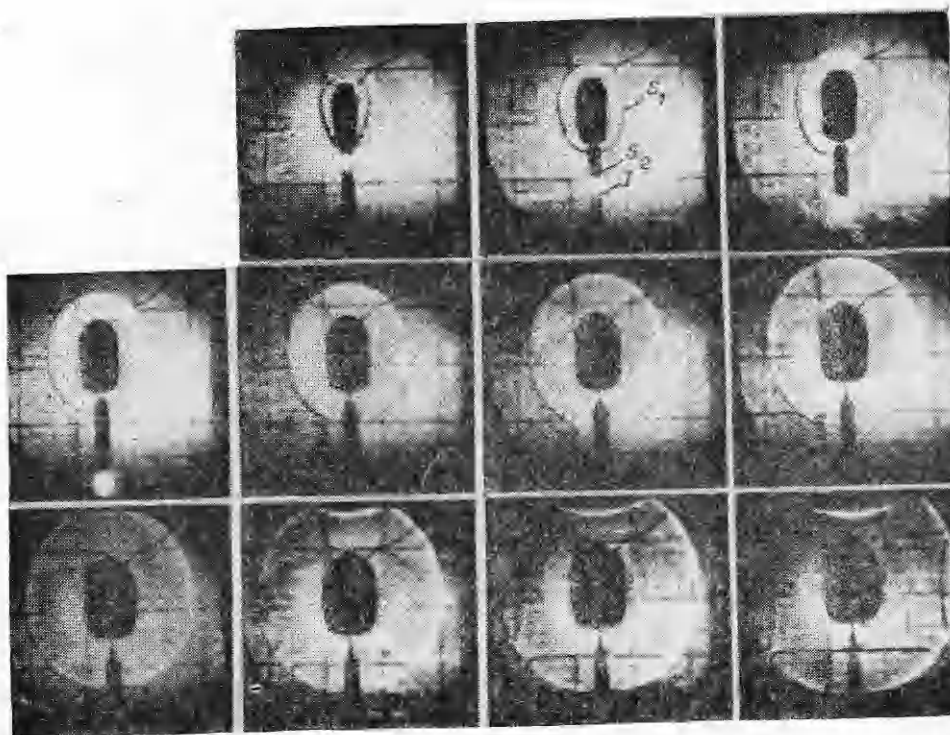


Рис. 2. Фотохронограмма опыта (модель I твердое ВВ ТГ 25/75, вода, аргон).
 S_1 — сферическая ударная волна в воде; S_2 — фронт продуктов взрыва; I — фронт ударной волны в канале. Интервал между кадрами 8 мкс.

лению в зависимости от заданной информации о типе сетки (равномерная по расстоянию, равномерная по массе, прямолинейная через точки разбиения границ, ортогональная к некоторой линии через точки разбиения границ, ортогональная к некоторой линии через точки разбиения и т. д.). На каждом счетном шаге вначале делается расчет лагранжевой газодинамики, затем проводится построение новой счетной сетки в соответствии с заданной информацией и, наконец, делается интерполяция величин со старой сетки на новую. Этот пересчет проводится с соблюдением законов сохранения массы, количества движения и внутренней энергии. На этом заканчивается счет шага.

Первая серия расчетов относилась к модели I, вторая — к модели II. Типичная геометрия системы, которая задавалась для двумерных расчетов, приведена на рис. 4, 5. Вода (соответственно фреон-12) выделялась в отдельную счетную область (область 2), продукты взрыва и аргон (водород) объединялись в другую счетную область (область 1). Контактная граница веществ являлась лагранжевой линией. В начальный момент в расчетах модели I везде, кроме продуктов взрыва, задавалось нулевое давление, а в расчетах модели II — давление, равное одной атмосфере. Эти же давления использовались как краевые условия на границах системы.

Запишем уравнение состояния газов

$$p = \Gamma \rho \epsilon.$$

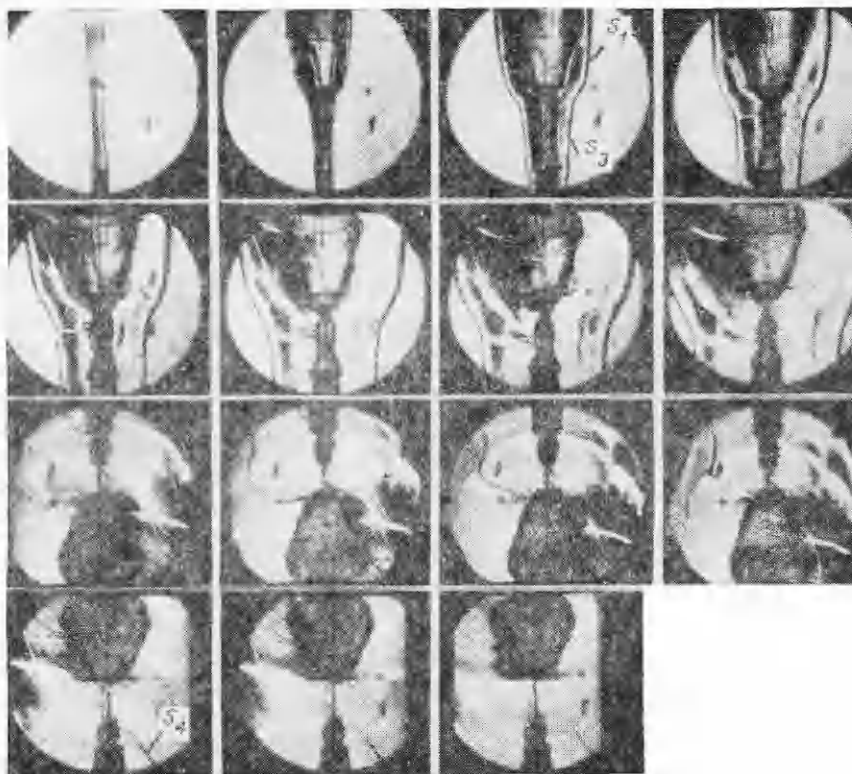


Рис. 3. Фотохронограмма опыта (модель II $C_2H_2 + 2,5 O_2$, фреон-12, водород).
 S_1 — фронт ударной волны во фреоне-12; S_2 — головная волна; S_3 — вторичная ударная волна (отраженная от торца канала). Интервал между кадрами 64 мкс.

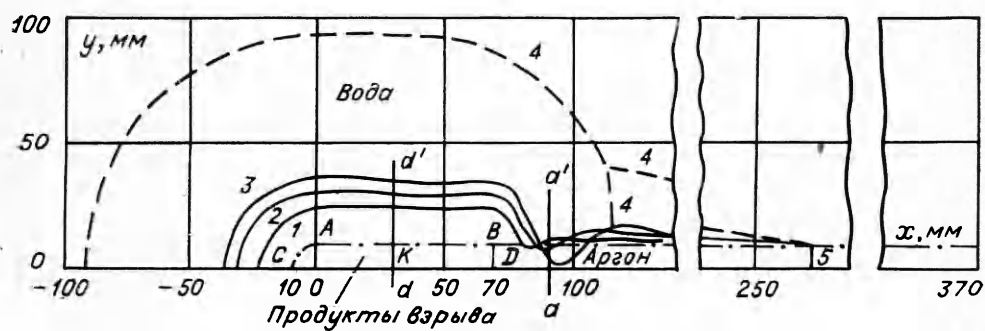


Рис. 4. Положение контактных границ и ударных волн из расчета модели I.
 Штрихпунктир — начальная геометрия канала: $CD=80$ мм, $OA=BD=10$ мм, $CK=KD=40$ мм. 1, 2, 3 — форма канала в моменты времени $t=10, 20, 35, 58$ мкс; 4, 5 — форма ударных волн в воде и аргоне на моменты времени $t=35, 58$ мкс.

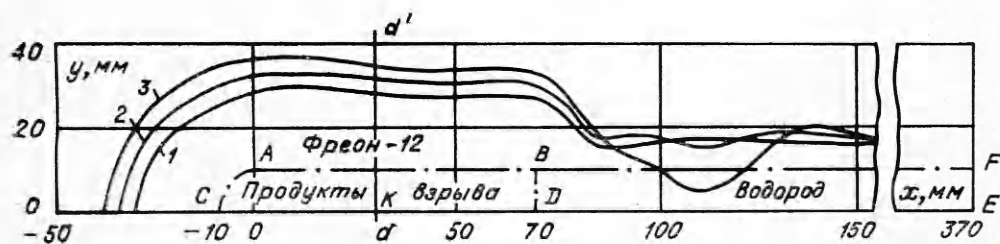


Рис. 5. Форма канала в моменты времени $t=100, 200, 300$ мкс (кривые 1, 2, 3) из расчета модели II.

Штрихпунктир — начальная геометрия: $CD=80$ мм, $OA=BD=10$ мм, $CK=KD=40$ мм.

Уравнение состояния воды принималось в форме Ми-Грюнайзена [10]

$$p = p_x + p_t,$$

где

$$p_x = \rho_0 c_0^2 (\delta^n - 1)/n, \quad p_t = \Gamma \rho (\epsilon - \epsilon_x),$$

$d\epsilon_x = -p_x dv$, со следующими значениями параметров: $\rho_0 = 1$ г/см³, $c_0 = 1,48$ км/с, $n = 6$, $\Gamma = 1/3$, которые подбирались на основе экспериментальных данных по ударной адиабате воды [11]. Уравнение состояния продуктов взрыва смеси тротила с гексогеном принималось в форме, предложенной в [1]. Предполагалось, что в начальный момент произошло энерговыделение по всей массе ВВ, начальное давление в расчетах модели I—154 кбар, в расчетах модели II—23 бар.

Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментом. Сравнение проводилось по $R-t$ -диаграммам контактных границ вдоль оси симметрии системы и в сечении dd' и $R-t$ -диаграммам ударных волн. На рис. 6 приведены расчетные и экспериментальные данные для модели I ($L = 80$ мм, $d = 20$ мм). В расчетах получен эффект захлопывания. Из сопоставления данных рис. 6 видно, что расчет хорошо описывает эксперимент. На рис. 7 приведены аналогичные данные для модели II ($L = 80$ мм, $d = 20$ мм). Совпадение, учитывая экспериментальный разброс, следует также считать хорошим. Штриховыми линиями на рис. 7 изображены результаты расчета с другим коэффициентом Грюнайзена для детонирующей смеси ($\Gamma = 0,4$), что соответствует $p_0 = 66,7$ бар. К моменту полного захлопывания из образующей полости в модели I уходит в канал $\sim 15\%$ продуктов взрыва и $\sim 30\%$ в модели II, что соответствует оценкам, полученным при анализе экспериментов.

Лабораторные эксперименты и расчеты дают следующую картину явления¹. В начальный момент

происходит распад разрыва на контактных границах: начинается движение границ ПВ—вода и ПВ—аргон и распространение ударных волн в воде и аргоне. Поскольку плотность воды много больше плотности аргона, давление в ударной волне, распространяющейся по воде, оказывается существенно больше давления в волне, идущей по аргону. Скорости контактной границы ПВ—аргон и ударной волны в аргоне в начальный момент существенно больше скорости границы ПВ—вода и ударной волны в воде. Ударная волна в воде, распространяющаяся от источника энергии, приобретает со временем сферическую форму.

Рассмотрим движение точки А границы канала, расположенной в сечении aa' (см. рис. 4). Сначала в это сечение приходит ударная волна 5, распространя-

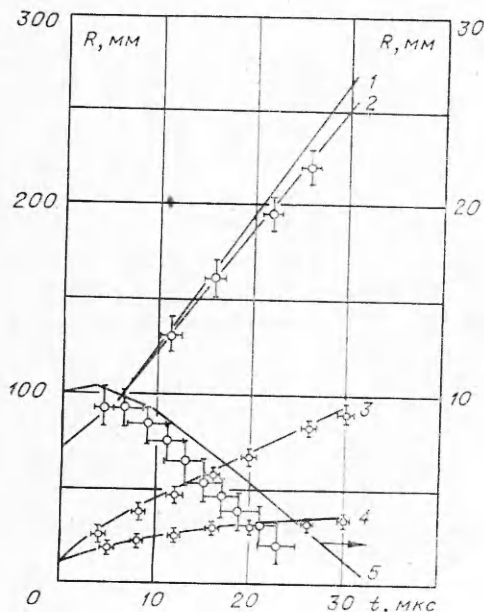


Рис. 6. $R-t$ -диаграммы.

1 — фронт ударной волны в канале; 2 — контактная граница в канале; 3 — фронт ударной волны в воде; 4 — контактная граница в сечении dd' (см. рис. 4); 5 — радиус канала в месте захлопывания.

¹ Картина явления в моделях I и II в основных чертах совпадает, поэтому там, где не оговорено противное, будет обсуждаться модель I.

ющаяся по аргону. Канал под действием давления за фронтом этой волны начинает расширяться. Затем в это сечение приходит ударная волна 4 распространяющаяся по воде. Под действием возникшей разности давлений в воде и аргоне, канал начинает схлопываться. Место захлопывания определяется характерным линейным параметром задачи, начало захлопывания определяется временем, за которое ударная волна в воде проходит расстояние, равное этому линейному параметру. В расчетах длина заряда существенно больше диаметра и поэтому не определяет место и время начала захлопывания; определяющим параметром является диаметр канала.

Как в экспериментах, так и в расчетах место захлопывания отстоит от начального положения контактной границы ПВ — аргон на расстоянии порядка 1,5 диаметра канала. Время начала захлопывания составляет ~ 5 мкс для модели I и ~ 100 мкс для модели II. Рис. 4 и фотохронограммы опыта (см. рис. 2, 3) подтверждают приведенные выше рассуждения о физической картине явления захлопывания.

Для выяснения влияния скорости звука в невозмущенном «грунте» на эффект захлопывания был проведен расчет модели I, в котором уравнение состояния воды принималось в виде $p = \Gamma \rho \epsilon$, где $\Gamma = 1/3$. Место захлопывания при этом не изменилось, но время начала захлопывания увеличилось в ~ 6 раз, что соответствует различию в средних скоростях ударной волны в «грунте».

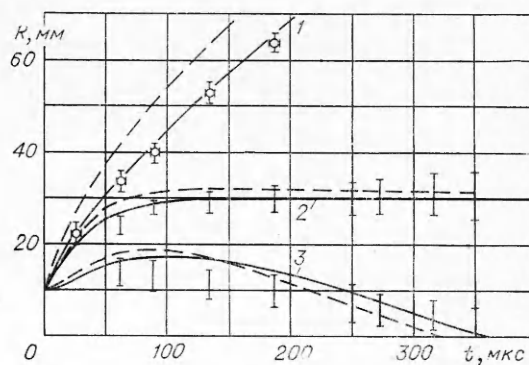


Рис. 7. $R-t$ -диаграммы.

1 — фронт ударной волны по фреону-12; 2 — контактная граница в сечении dd' (см. рис. 5); 3 — радиус трубы в месте захлопывания.

Поступила в редакцию
10/XI 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Зубарев, М. В. Жерноклетов, Г. С. Телегин. ПМТФ, 1969, 4, 127.
2. Б. А. Иванов. Физика взрыва ацетилена. М., 1969.
3. Д. Кей, Г. Леби. Таблицы физических и химических постоянных. М., 1962.
4. В. К. Crowley, H. D. Glenn, R. F. Marks. J. Geo. Res., 1971, 76, 14, 3356.
5. В. К. Crowley, H. D. Glenn. J. Appl. Phys., 1970, 41, 689.
6. Е. Е. Мешков. Изв. АН СССР, МЖГ, 1969, 5, 151.
7. А. С. Дубовик. Фотографическая регистрация быстротекущих процессов. М., 1964.
8. М. В. Баталова, С. М. Бахрах и др. Тр. Всесоюзного семинара по численным методам механики вязкой жидкости. Новосибирск, 1969.
9. Н. А. Дмитриев, Л. В. Дмитриева и др. Всесоюзная школа «Теоретические основы и численные методы решения задач математической физики». Кишинев, 1975.
10. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., 1966.
11. G. A. Gartman, J. W. Kirsch, C. R. Hastings. J. Appl. Phys., 1971, 42, 2.