

С. Д. САВРОВ, А. Н. ДРЕМИН

НОВЫЙ МЕТОД ГЕНЕРАЦИИ СИЛЬНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН В ГАЗЕ

(Представлено академиком В. Н. Кондратьевым 3 III 1970)

Широко распространенным инструментом для исследования релаксационных и оптических явлений в низкотемпературной плазме является ударная труба. Обычная ударная труба использует энергию сжатого газа в секции высокого давления и позволяет получать скорости ударной волны до 5 км/сек⁽¹⁾.

Для получения более высоких скоростей ударной волны применяется предварительный нагрев газа в секции высокого давления сжиганием стехиометрической смеси кислорода с водородом или электрическим разрядом^(2, 3). В результате, при низких начальных давлениях (1 мм рт. ст.) рабочего газа (воздуха, аргона) удается достигать скоростей до 10 км/сек. Увеличение скоростей ударной волны до 15—20 км/сек, которым соответствуют температуры газа в несколько десятков тысяч градусов, представляет интерес для исследования ряда вопросов динамики излучающего газа и для проведения некоторых экспериментов по магнитной гидродинамике.

Настоящая работа предпринята с целью исследования возможности получения ударных волн в газе с такими скоростями при помощи детонации конденсированного в.в.

Высокоскоростная ударная волна пригодна для проведения перечисленных выше исследований, если она имеет плоский фронт и значительную область ламинарного потока за фронтом. Другим требованием является прозрачность «пробки» нагретого газа, так как только в этом случае возможны спектроскопическая диагностика состояния плазмы и наблюдение газодинамических явлений за фронтом оптическими методами (шпирные, теневые и др. схемы).

Перечисленным требованиям не удовлетворяют взрывные устройства^(4, 5), в которых за счет кумулятивного эффекта достигаются очень сильные ударные волны (до 40 км/сек), пригодные, однако, в качестве мощных поверхностных излучателей света.

На рис. 1 приведена схема ударной трубы взрывного действия, которая в значительной степени совмещает потенциальные возможности взрывного метода с достоинствами обычной ударной трубы и удовлетворяет перечисленным выше требованиям.

Идея метода заключается в предварительном нагреве и одновременном сжатии толкающего газа (гелия или водорода) в ударной волне, создаваемой разлетом продуктов детонации от плоской детонационной волны. Ударная волна в отсеке 5, образующаяся при взрыве заряда 3 после дополнительного усиления в сужающемся отсеке 7 разрывает тонкую диафрагму из майларовой пленки 9 и генерирует ударную волну в отсеке 10, заполненном рабочим газом при давлении 0,5 ÷ 30 мм рт. ст. (Отсек 7 с переменным сечением не играет принципиальной роли в предлагаемом методе и служит для согласования труб разного диаметра.)

Вопрос о возможности создания детонацией в.в. плоской ударной волны со значительной областью однородно нагретого газа в отсеке 5 не является тривиальным. В частности, такая ударная волна не может быть создана с использованием кумулятивной струи, примененной в работе⁽⁶⁾.

Эксперименты по наблюдению самосвечения газа в ударной волне, созданной разлетом плоской детонационной волны со свободной поверхности заряда, показали, что плоские ударные волны в газе, со значительной «пробкой», образуются при начальном давлении >100 мм рт. ст. При меньшем давлении усиливается перемешивание газа с продуктами детонации на контактной поверхности и размеры пробки сокращаются.

С другой стороны, оказалось, что затухание скорости ударной волны сильно уменьшается при понижении начального давления, что позволяет увеличить отношение длины ударной трубы к размерам заряда в.в. Этот

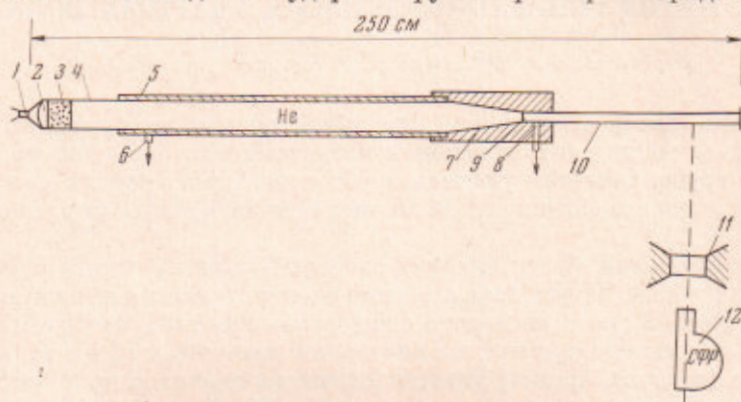


Рис. 1. Схема ударной трубы взрывного действия 1 — капсюль; 2 — взрывная линза, формирующая плоский детонационный фронт; 3 — таблетка прессованного гексогена плотностью $1,73 \text{ г/см}^3$, весом $0,5 \text{ кг}$; 4 — стеклянная труба диаметром 100 мм , длиной 250 мм , разрушаемая в опыте; 5 — стальная труба, диаметром 110 мм , длиной $1,5 \text{ м}$; 6, 8 — вакуумные входы; 7 — металлическая насадка с раствором конуса 20° ; 9 — майларовая пленка; 10 — стеклянная трубка, длиной 1 м , диаметром 35 мм , заполненная рабочим газом; 11 — иллюминатор в стенке взрывной камеры; 12 — фоторегистр.

факт имеет важное значение при конструировании стационарной взрывной ударной трубы с сохраняемыми узлами.

В качестве оптимального начального давления в гелии выбрано атмосферное давление. При этих условиях скорость ударной волны к концу отсека 5 (рис. 1) затухает на 7% . Дополнительного уменьшения затухания ударной волны в толкающем газе можно добиться применением оболочки заряда.

В опытах по схеме, приведенной на рис. 1, скорость ударной волны в гелии при атмосферном начальном давлении составляла $9,0 \text{ км/сек}$. Этому соответствует давление за падающей волной 100 ат и температура $\sim 7500^\circ \text{ К}$. За отраженной волной давление должно составлять около 700 ат и температура $\sim 17\,000^\circ \text{ К}$.

Следует учесть, что нагрев газа не сопровождается увеличением молекулярного веса за счет добавки горючей газовой смеси или в результате распыления материала электродов, которое снижает эффективность нагрева газа в других методах форсирования режима работы ударной трубы. В зависимости от материала и толщины диафрагмы возможны различные варианты условий образования ударной волны. В частности, при использовании майларовой диафрагмы, которая разрывается за время порядка 1 мсек , последующий распад газодинамического разрыва происходит в движущейся системе координат. Таким образом, в образовании ударной волны в рабочем газе используется и внутренняя и кинетическая энергия движущегося толкающего газа. В таком режиме генерации ударных волн полностью исключается возможность радиационного остывания газа за время эксперимента.

В качестве рабочего газа в отсеке 10 использовался воздух и аргон при различных начальных давлениях. Наблюдение структуры ударной волны проводилось по наблюдению самосвечения нагретого ударной волной газа. Типичная фоторазвертка приведена на рис. 2. В диапазоне исследованных начальных давлений ($0,5 \div 30$ мм рт. ст.) ударные волны имеют плоский фронт и заметную «пробку» за фронтом. Размеры этой пробки ($3 \div 4$ см), образующейся в стеклянной трубке (рис. 1), длиной 1 м и диаметром 35 мм, удовлетворительно согласуются с теорией реальной ударной трубы (⁷), учитывающей перетекание газа из пробки в пограничный слой.

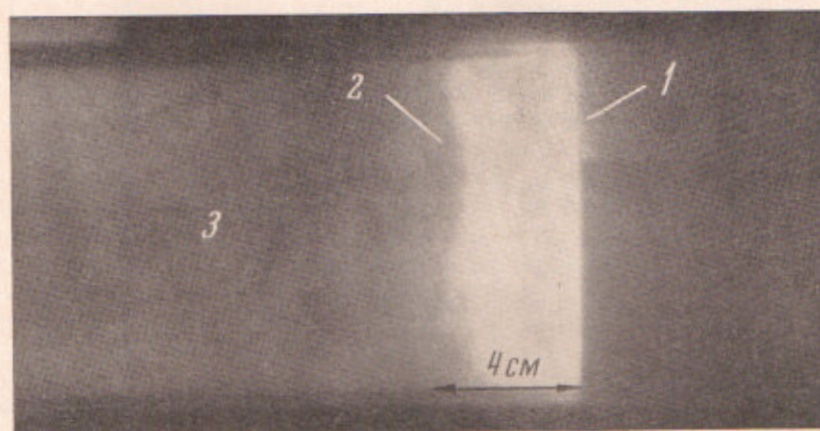


Рис. 2. Боковая фоторазвертка свечения ударной волны в воздухе при начальном давлении 1,0 мм, рт. ст. 1 — фронт ударной волны; 2 — контактная поверхность; 3 — свечение толкающего газа. Скорость ударной волны составляет 18,3 км/сек

Дополнительные эксперименты с просвечиванием пробки взрывным аргоновым источником света показали, что в видимой области в исследованном диапазоне начальных давлений в воздухе пробка является прозрачной.

В табл. 1 приведены результаты измерения скоростей ударной волны (в конце трубки) в различных газах при различных начальных давлениях. (Для измерения скоростей ось фоторегистра направлялась вдоль оси трубы с помощью зеркал.) Там же приведены оценки температур и давлений за ударной волной по данным работ (⁸⁻¹⁰).

Если использовать в экспериментах отраженную от плоского торца ударную волну, аналогично подобным экспериментам в обычных трубах, диапазон термодинамических состояний газа, доступных для исследования, может быть еще более расширен.

Схема опытов, приведенная на рис. 1, требует специального помещения с дистанционным управлением. Необходимость замены после каждого опыта стеклянной трубки 10 (рис. 1), разрушаемой взрывом, оправдывается необходимостью спектральной чистоты при исследовании излучательной способности ударной волны.

Проблема создания стационарной установки с сохраняемым отсеком наблюдения может быть, при необходимости, решена. Об этом свидетельствует, в частности, сообщение (¹¹) о построении импульсного МГД-генератора, использующего высокоскоростной поток продуктов детонации и рассчитанного на применение зарядов весом 0,5 кг.

В заключение отметим, что важным достоинством взрывного метода генерации сильных ударных волн является отсутствие в трубе толстых металлических диафрагм. Это создает лучшие условия для формирования

Таблица 1

Параметры ударных волн в различных газах

	Воздух		Гелий	Аргон
Начальное давление, мм рт. ст.	10,0	1,0	10,0	3,0
Скорость ударной волны, км/сек	13,8	18,3	18,0	15,0
Т-ра за падающей волной, °K	18 000	19 500	20 000	28 000
Давление за волной, атм.	65	8	10	—
Затухание скорости ударной волны к концу трубы, %	—	8	3	10

ударных волн, в частности, при очень низких начальных давлениях газа, а также позволяет конструировать ударные трубы с очень большим диаметром.

Институт химической физики
Академии наук СССР

Поступило
10 XII 1969

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Ударные трубы, Сборн. переводов статей под ред. X. А. Рахматулина и С. С. Семенова, ИЛ, 1962. ² A. Herzberg, W. Smith, J. Appl. Phys., 25, 130 (1954). ³ J. S. Samm, P. H. Rose, Phys. Fluids, 6, 663 (1963). ⁴ А. Е. Войтенко, ДАН, 158, № 6 (1964). ⁵ А. Е. Зацепин, Е. Г. Попов, М. А. Цикулин, ЖЭТФ, 54, № 1 (1968). ⁶ Н. П. Новиков, ДАН, 147, № 3, 597 (1962). ⁷ Е. В. Ступоченко, С. А. Лосев, А. И. Осипов, Релаксационные процессы в ударных волнах, «Наука», 1965. ⁸ Н. М. Кузнецов, Термодинамические функции и ударные адiabаты воздуха при высоких температурах, М., 1965. ⁹ Г. Н. Козлов, Е. А. Ступицкий, Журн. прикл. мех. и техн. физ., 3, 94 (1968). ¹⁰ В. В. Журин, О. К. Костко, Инж. журн., 5, в. 1 (1965). ¹¹ М. С. Джонс, П. В. Вебстер и др., Тр. VI симпозиума по инженерным проблемам магнитной гидродинамики, «Наука», 1968.