

ЛИТЕРАТУРА

1. Магнитогидродинамические генераторы открытого цикла. М., «Мир», 1972.
2. Дикс Дж. Б., Ву И. К. Л., Денцел Д. Л., Кроуфорд Л. В. Мюльхаузер Дж., Чанг П., Шанглин Р. В., Зиноу Ю. Некоторые результаты исследования генератора с диагонально проводящими стенками. МГД-метод получения энергии. М., «Энергия», 1971.
3. Залкинд В. И., Кириллов В. В., Маркина А. П., Тихоцкий А. С., Успенская Г. Л. Экспериментальное исследование катодных пятен на выступающих в поток металлических электродах. — ПМТФ, 1974, № 2.
4. Кириллин В. А., Шейндлин А. Е., Шумяцкий Б. Я., Кириллов В. В., Буренков Д. К., Раховский В. И. Некоторые результаты исследований на модельной МГД-установке У-02. — В кн.: V Международный симпозиум по магнитогидродинамическому методу получения электрической энергии. Т. 1. Мюнхен, 1971.
5. Залкинд И. В., Троянкин Ю. В. Огнеупоры и шлаки в металлургии. М., Metallurgиздат, 1964.
6. Зыкова Н. М., Канцель В. В., Раховский В. И., Селиверстова И. Ф., Устимец А. П. Динамика развития катодной и анодной областей электрической дуги. — ЖТФ, 1970, т. XL, вып. 11.
7. Залкинд В. И., Зуева Н. В., Кириллов В. В., Маркина А. П., Тихоцкий А. С., Игитханов Ю. Л., Исаенков Ю. И., Недоспасов А. В., Побережский Л. П., Пузырев М. К. Исследование микродугового режима работы электродов в МГД-генераторе открытого цикла. — В кн.: I Советско-американский коллоквиум по МГД-преобразованию энергии. М., 1974.
8. Буренков Д. К., Долинский Ю. П., Замыслов О. Б., Залкинд В. И., Зеликсон Ю. М., Кириллов В. В., Горостылев В. Ф., Маркина А. П., Тихоцкий А. С. Влияние шлаковых пленок на работу электродов и характеристики канала МГД-генератора открытого цикла. — В кн.: VI Международный симпозиум по магнитогидродинамическому методу получения электроэнергии. Вашингтон, 1975.

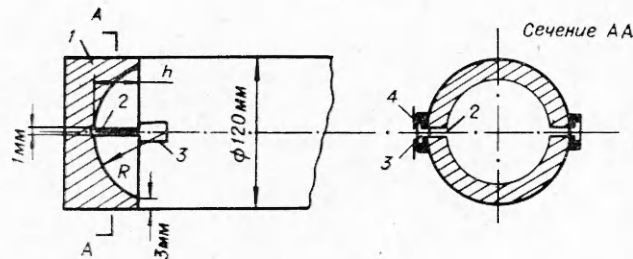
УДК 533.6.011.72.

**КУМУЛЯТИВНЫЙ ЭФФЕКТ УДАРНОЙ ВОЛНЫ,
ОТРАЖЕННОЙ ОТ СФЕРИЧЕСКОЙ ВОГНУТОЙ СТЕНКИ***Б. А. Клопов, Е. Е. Мешков, А. И. Толшмяков**(Москва)*

В работе [1] описан кумулятивный эффект, возникающий при отражении ударной волны от цилиндрической вогнутой стенки, помещенной в конце канала ударной трубы прямоугольного сечения. Интенсивность отраженной волны (число Маха M) при этом возрастала \sim в 1,5 раза по сравнению со случаем отражения волны от плоской стенки.

Эксперименты проводились на ударной трубе, конструкция которой сходна с описанной в [2]. Камера и канал ударной трубы изготовлены из обычной стальной трубы с внутренним диаметром 208 мм. В конце канала помещалась измерительная секция — стальная труба с внутренним диаметром 120 мм. Передняя часть этой трубы с острыми кромками заходила в глубь канала с таким расчетом, чтобы волна, заходящая между стенками канала и измерительной секции, не влияла на течение в последней во время эксперимента. В качестве рабочей диафрагмы использовалась пленка из ацетата целлюлозы толщиной 0,2 мм в 2 слоя. По обе стороны диафрагмы был воздух: в канале — при атмосферном давлении, в камере — при давлении 2,5 ати; число Маха ударной волны равно $1,27 \pm 0,01$.

На фиг. 1 приведена схема устройства измерительной секции, где проводился эксперимент. Конец измерительной секции заглушали плотно



Ф и г. 1

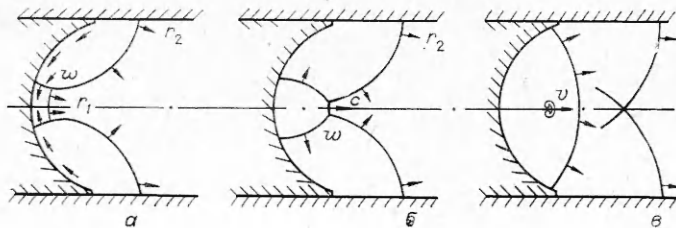
входящей пробкой 1 из органического стекла. Торец пробки имел углубление в форме сферической чаши. В теле пробки пропиливали сквозную щель 2 шириной ~ 1 мм. Плоскость щели совпадала с осью трубы измерительной секции. В стенке измерительной секции прорезали два окна 3 шириной ~ 10 мм, в которых устанавливали стекла с плоскими поверхностями. На наружной поверхности одного из окон устанавливали регулирующую щель 4 шириной 0,4–0,5 мм. При сборке измерительной секции и установке ее на ударной трубе совмещали в одной плоскости ось ударной трубы, щель в пробке, окна в стенках измерительного узла, регулирующую щель и оптическую ось фоторегистрирующей системы.

Процесс отражения ударной волны регистрировался при помощи теневого прибора ИАБ-451 и сочлененной с ним камерой СФР в режиме фотохронографа. Для подсветки использовался импульсный источник света ИФК-120. Запуск источника света осуществлялся импульсом от пьезодатчика.

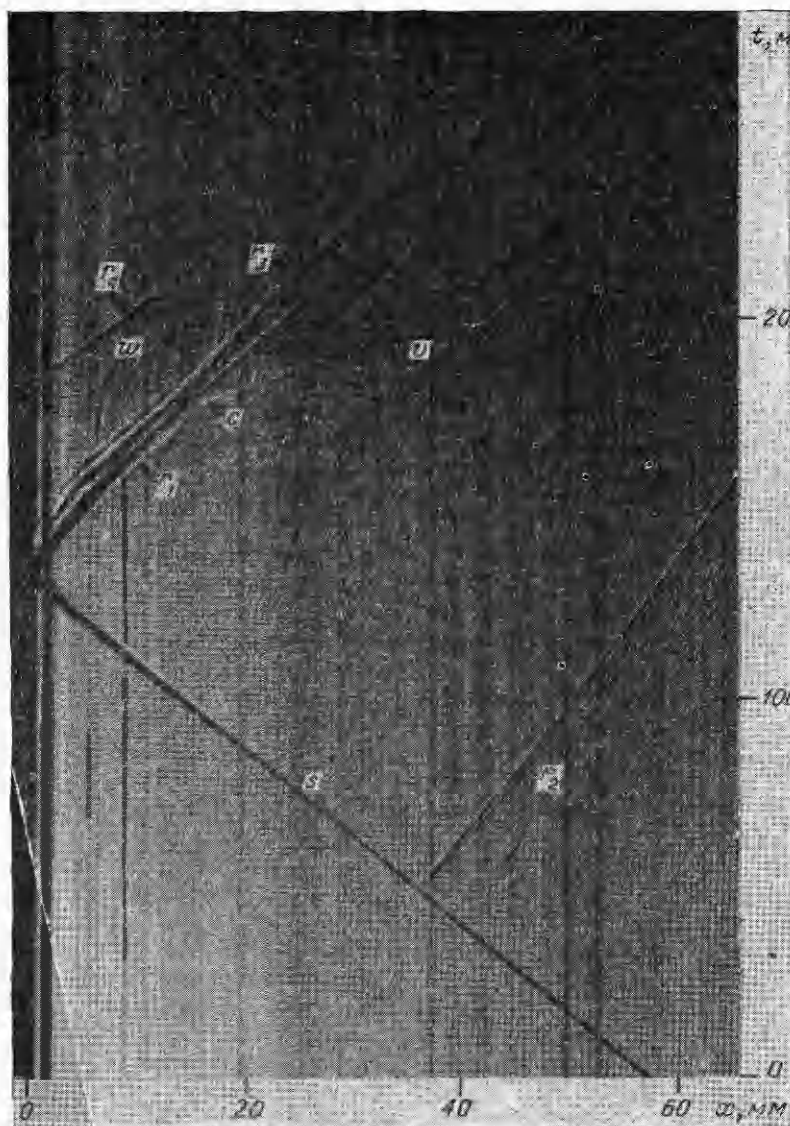
Пробой диафрагмы ударной трубы осуществлялся при помощи электрического взрыва проволочки. Это позволило синхронизировать работу ударной трубы и камеры СФР.

Величина вогнутости стенки, от которой отражается ударная волна, характеризуется безразмерным параметром h/R , где h — высота; R — радиус сферического сегмента (см. фиг. 1). Была проведена серия экспериментов, в которых h/R изменялось от 0,1 до 0,9.

Геометрия эксперимента исключает возможность получения теневых фотографий отдельных моментов картины течения, как это было сделано в работе [1], однако сходство $x-t$ -диаграмм в том и другом случае позволяет качественно представить картину течения (фиг. 2) в описываемых ниже экспериментах. В случае $h/R \geq 0,5$ ударная волна, отразившись от дна сегмента, приобретает сферическую форму r_1 (фиг. 2, а). Кумулятивный эффект возникает при схлопывании цилиндрической поперечной волны w на оси трубы, а поперечная волна — под действием потока вещества, скользящего по стенкам сегмента к центру. Этот поток появляется при отражении падающей волны на наклонных стенках сферического



Ф и г. 2



Ф и г. 3

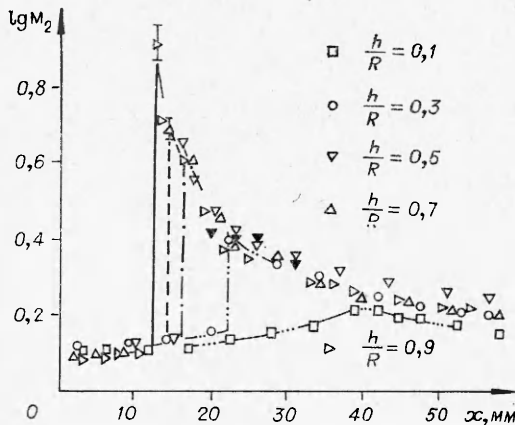
сегмента. Схлопывание поперечной волны w приводит к скачку скорости отраженной волны c (фиг. 2, б) в осевом направлении. Затем волна расходится и интенсивность ее быстро падает.

Небольшая порция газа, нагретая и разогнанная до большой скорости (1–2 км/с) ударной волной c в момент ее образования, расширяется и образует вихревое кольцо v (фиг. 2, в), скорость которого затем быстро гаснет. Траектории движения этих волн и вихря можно проследить на $x-t$ -диаграмме одного из экспериментов ($h/R=0,5$), приведенного на фиг. 3, где s —фронт падающей волны; r_1 —сходящаяся сферическая волна, отраженная от дна сегмента; r_2 —траектория фронта ветви волны, отраженной от переднего края сегмента; w —след схлопывания поперечной волны; v —траектория движения вихревого кольца.

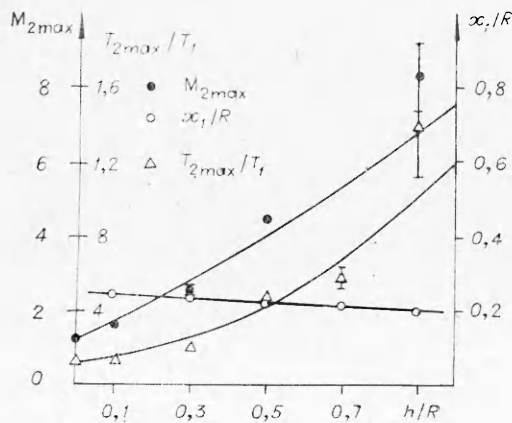
Побочным эффектом щели в теле сегмента является возникновение волны r_3 , движущейся по щели и отстающей от волн r_1 и c , поперечная волна схлопывается в форме конуса, обращенного вершиной в сторону отраженной волны. Волна r_2 возникает при схлопывании поперечной волны w на дне сегмента.

В случаях $h/R \leq 0,5$ наблюдаются некоторые отклонения от описанной выше картины течения. При $h/R \leq 0,3$ вихрь не образуется, а в случае $h/R = 0,1$ излом в траектории отраженной волны на $x-t$ -диаграмме заменяется плавным изгибом. По временным разверткам ($x-t$ -диаграммам) течения по оси канала ударной трубы можно определить скорость и некоторые другие параметры состояния за фронтом отраженной волны. Скорость падающей и отраженной волн, а также скорость движения вихря измерялись по наклону траекторий на негативах $x-t$ -диаграмм при помощи микроскопа БМИ-1. Расчет числа Маха отраженной волны M_2 и температуры T_2 за фронтом отраженной волны проводился в предположении постоянства значения $\gamma = 1,4$, начальная скорость звука в воздухе перед фронтом падающей волны 344 м/с.

На фиг. 4 приведена зависимость M_2 от пути x , пройденного отраженной волной r , для разных значений h/R . Пусть x отсчитывается от дна сегмента. Зачерненные точки получены по измерениям скорости вихря. Эти измерения фактически определяют массовую скорость вещества за фронтом ударной волны и дают дополнительное подтверждение непосредственным измерениям скорости ударной волны. Ошибки здесь и далее приведены с вероятностью 50%. В случае $h/R \geq 0,3$ интенсивность волны вначале слабо растет и затем скачком увеличивается, при этом достигается максимальное значение M_2 . Сразу же после этого начинается уменьшение M_2 . Эти особенности проявляются тем резче, чем больше h/R . В случае $h/R = 0,1$ наблюдается рост интенсивности отраженной волны, но без скачка.



Фиг. 4



Фиг. 5

С увеличением h/R увеличивается и $M_{2\max}$ (фиг. 5), одновременно уменьшается расстояние x , на котором происходит скачок скорости отраженной волны, но относительная величина x_1/R слабо зависит от h/R . На фиг. 5 приведены результаты расчета максимально достижимых значений температуры $T_{2\max}$ в зависимости от h/R . При отраженной ударной волне с $M_1 = 1,27$ в воздухе

от плоской жесткой стенки расчет дает значение температуры \bar{T}_2 , равное 400К. В то же время из данных фиг. 5 следует, что в случае $h/R = 0,9$ за фронтом отраженной волны достигается температура ~ 3500 К. При таких температурах должно произойти заметное изменение величины γ , однако характерные расстояния, на которых реализуются максимальные значения скорости волны очень малы, соответственно малы и характерные времена. Для случая $h/R = 0,9$ число Маха отраженной волны падает \sim от 8 до 4 на расстояниях порядка 1—2 мм за времена порядка 0,5—1 мкс. За такие малые времена при температурах ≤ 3500 К равновесие не успевает устанавливаться, и изменением γ можно пренебречь.

Наличие щели в теле сегмента каким-то образом возмущает течение, однако на фронте ударной волны возмущения затухают приблизительно в 10 раз на расстояниях $\sim 3\lambda$ (λ — длина волны возмущения [3]). В нашем случае λ порядка ширины щели. В описываемых экспериментах минимальное расстояние, на котором происходит скачок скорости (при $h/R = 0,9$), $x_1 = 12$ мм, что много больше ширины щели $\simeq 1$ мм. Наличие щели, если и оказывает влияние, то скорее в сторону уменьшения эффекта кумуляции.

В заключение отметим, что более специальные формы углубления в торце пробки в конце канала ударной трубы могут привести к еще большему эффекту. В частности, к усилению эффекта может привести форма поверхности сегмента, в которой осуществлялось бы схлопывание поперечной волны в форме цилиндра или в форме конуса, обращенного вершиной ко дну сегмента.

Поступила 27 VIII 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Мешков Е. Е. Отражение плоской ударной волны от жесткой вогнутой стенки. — «Изв. АН СССР. МЖГ», 1970, № 4, с. 33.
2. Schardin H. Ein Beispiel zur Verwendung des Stosswellenrohres für Probleme der instationären Gasdynamik. — ZAMP, 1958, Bd 9, N 5/6, S. 606—621. Рус. пер. в кн.: Ударные трубы. М., ИЛ, 1962.
3. Kovitz A. A., Briscoe M. G. Stability of a plane shock waves in free space and in the presence of rigid or interfacial boundaries. — «J. acoust. Soc. Amer.», 1969, vol. 45, N 5, p. 1157—1165.

УДК 533.6.011 : 51.72

О МОДЕЛЯХ ПОТОКОВ, АППРОКСИМИРУЮЩИХ СВОЙСТВА СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ

В. Г. Дулов

(Красноярск)

1. Свободная сверхзвуковая нерасчетная струя часто является набегающим потоком или фоном для более сложных явлений и процессов (фиг. 1, где штриховые линии — контактные разрывы, сплошные — ударные волны). Поэтому простота аналитического описания таких струй