

## Измерение распределения давления за фронтом сильной ударной волны

В. И. Федулов, В. Д. Борман

Согласно одномерной теории ударной трубы, в которой предполагается, что газ в канале трубы является идеальным, и пренебрегается трением газа о стенки трубы, за фронтом ударной волны появляется область равномерно нагретого газа, отделенного от толкающего газа контактной поверхностью. Эту область будем называть пробкой ударной волны. Экспериментально измеренная длина пробки оказывается меньше длины, рассчитанной по идеализированной теории. Это расхождение при сравнительно небольших скоростях ударной волны ( $M < 8$ ) объясняется влиянием пограничного слоя на течение газа в ударной трубе [1—3]. Кроме того, наличие пограничного слоя приводит к незначительному возрастанию давления, плотности и температуры газа по длине пробки. С возрастанием скорости волны этот эффект ослабевает. При этом, однако, увеличиваются потери на излучение, что в свою очередь из-за различного времени высвечивания участков плазмы, расположенных на различных расстояниях от фронта волны, может служить причиной неоднородности пробки. Поэтому представляет интерес провести измерение параметров плазмы по всей длине пробки, а не только на фронте волны.

Распределение давления по длине пробки ударной волны изучалось в работе [4]. Эксперименты, проведенные в этой работе на обычной ударной трубе, показали, что в течение первых 50 мксек давление в пробке сохраняется, а затем падает, составляя у контактной поверхности 80% от первоначального значения.

Цель настоящей работы — изучение распределения давления в пробке ударной волны, получаемой в электроразрядной ударной трубе. Особенность такой трубы (рис. 1) состоит в том, что для повышения температуры толкающего газа используется энергия электрического разряда. В связи с этим возникают по крайней мере два дополнительных обстоятельства, способствующих возникновению неоднородностей в пробке ударной волны: 1) время электрического разряда сравнимо с временем раскрытия диафрагмы; 2) мощность разряда непостоянна во времени.

### Методика эксперимента

Для измерения давления был изготовлен датчик, конструкция которого аналогична описанным в работах [5—8]. Особенности использованного в настоящей работе пьезодатчика состояли в следующем:

1) в качестве чувствительного элемента применялись диски пьезокерамики ЦТС-19 (цирконаттитанат свинца), которые по своим параметрам существенно лучше пьезокерамики титаната бария; диаметр диска 7 мм, толщина 0,5 мм;

2) диски пьезокерамики были бескислотно спаяны низкотемпературным сплавом Вуда, что позволило улучшить качество механического соединения дисков между собой и с торцом акустического цинкового цилиндра;

3) для изоляции от плазмы датчик был покрыт слоем эпоксидной смолы, что позволило спрофилировать торец датчика по внутренней поверхности трубы; сопротивление утечки пьезодатчика составляло несколько тысяч мегом.

Вся измерительная схема (см. рис. 1) пропускала без искажений импульсы длительностью до 700 мксек.

Пьезодатчики калибровались с помощью диафрагменного датчика [5]. Принцип работы диафрагменного датчика заключается в том, что закрепленная по окружности диафрагма под действием импульса давления прогибается до соприкосновения с иглой, конец которой с помощью микрометрического винта может устанавливаться на определенном расстоянии от центра диафрагмы. В работе [5] диафрагменный датчик применялся в условиях, при которых длительность импульса давления была намного меньше времени движения диафрагмы до иглы, а при расчете величины импульса давления по времени пробега диафрагмы последняя считалась незакрепленной.

В случае, когда с некоторого момента времени на диафрагму с поверхностной плотностью  $q$  действует постоянное давление  $p$ , что соответствует условиям, возникающим в ударной трубе, с учетом закрепления диафрагмы можно получить соотношение между зазором игла — диафрагма  $u$  и временем пробега диафрагмой этого зазора  $t$ :

$$u = \frac{1}{2,7q} pt^2.$$

Из этого соотношения следует, что величина  $pt^2/u$  постоянна. Проведенные эксперименты подтвердили этот вывод. Величина  $pt^2/u$  оказалась равной  $(273 \pm 7) \times 10^{-8}$  мм·сек/см. Типичная калибровочная осциллограмма показана на рис. 2. Эксперименты по измерению давления проводились в диапазоне чисел Маха 6—10. Исследовалась плазма аргона при начальном давлении

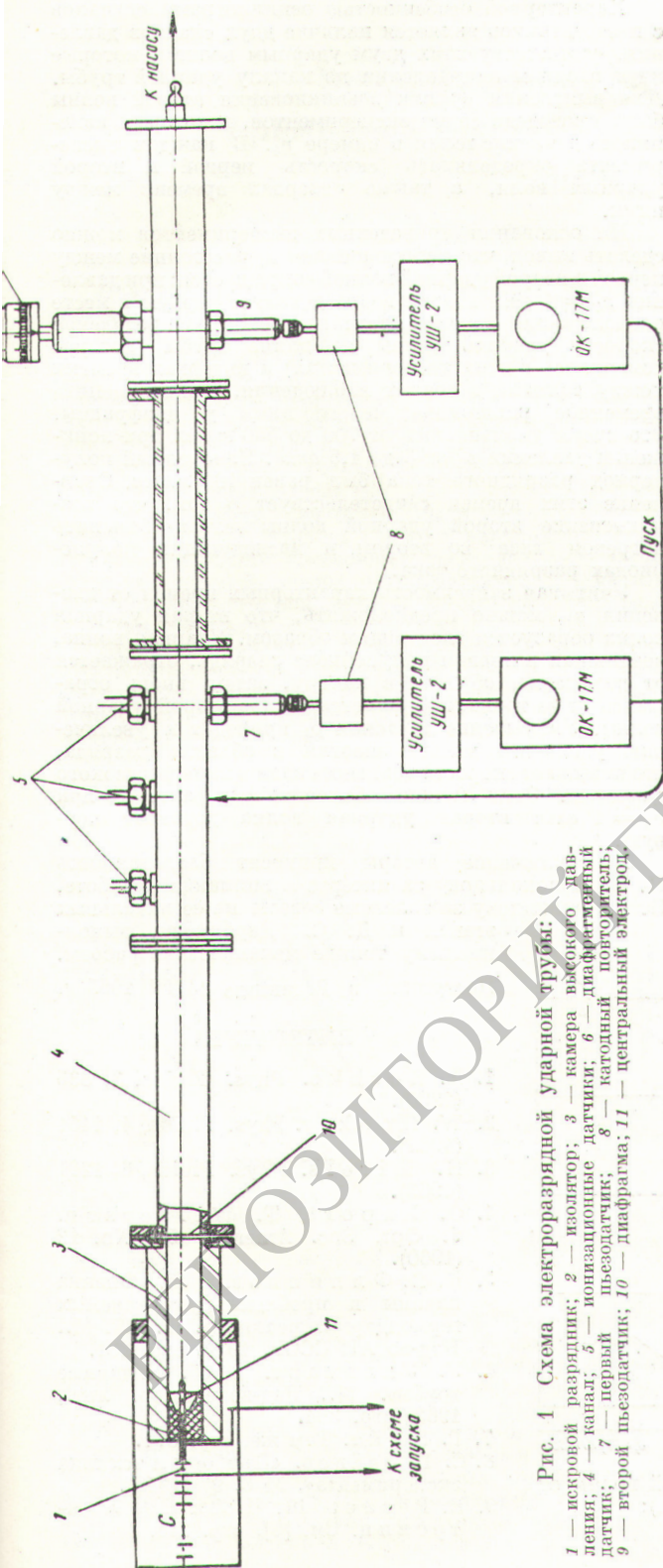


Рис. 1 Схема электроразрядной ударной трубы:

1 — искровой разрядник; 2 — изолятор; 3 — камера высокого давления; 4 — канал; 5 — ионизационные датчики; 6 — диафрагменный датчик; 7 — первый пьезодатчик; 8 — катодный поглотитель; 9 — второй пьезодатчик; 10 — диафрагма; 11 — центральный электрод.

его в канале 10 мм *рт. ст.* В качестве толкающего газа использовался гелий при давлении 3 атм, который нагревался разрядом от батарей конденсаторов, заряженных до 5—6 кВ. Давление в пробке ударной волны

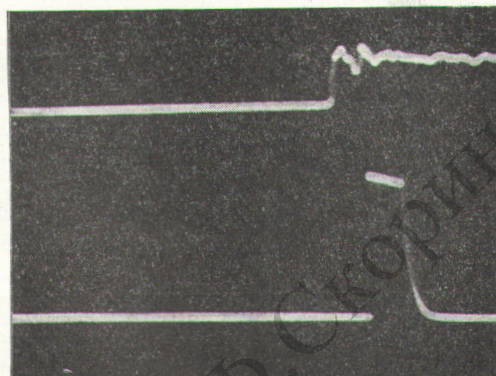


Рис. 2. Осциллограмма калибровочного эксперимента. (На верхний луч подается импульс с пьезодатчика; на нижний — сигнал с диафрагменного датчика.)

измерялось двумя пьезодатчиками, расположенными на расстоянии 263 и 303 см от диафрагмы (см. рис. 1). Оба осциллографа запускались одновременно, что позволяло по интервалу времени между сигналами с двух пьезодатчиков измерять скорость ударной волны на участке канала между ними.

### Экспериментальные результаты

Осциллограммы сигналов, полученные с двух пьезодатчиков, приведены на рис. 3. На осциллограммах отмечено положение контактной поверхности относительно фронта ударной волны, вычисленное с учетом влияния пограничного слоя по данным работы [3]. Видно, что давление за фронтом волны падает вплоть до контактной поверхности, где оно составляет примерно 85% от давления на фронте, а затем остается постоянным до появления второй ударной волны. Сравнение осциллограмм сигналов с первого и второго пьезодатчиков показывает, что спад давления в сечении ударной трубы, где находится первый датчик, больше, чем спад давления в месте расположения второго датчика. Гладкость импульса на нижнем луче после второго подъема давления объясняется тем, что луч осциллографа вышел из области линейной характеристики.

Зависимость давления на фронте первой ударной волны от ее скорости показана на рис. 4. Здесь же для сравнения приведена теоретическая кривая зависимости давления от скорости (сплошная линия), рассчитанная с учетом ионизации [9]. Обнаружено хорошее совпадение измеренных и рассчитанных величин давления не только в области, где влиянием ионизации на параметры плазмы можно пренебречь ( $M < 8$ ), но и в области существенной ионизации ( $M > 8$ ).

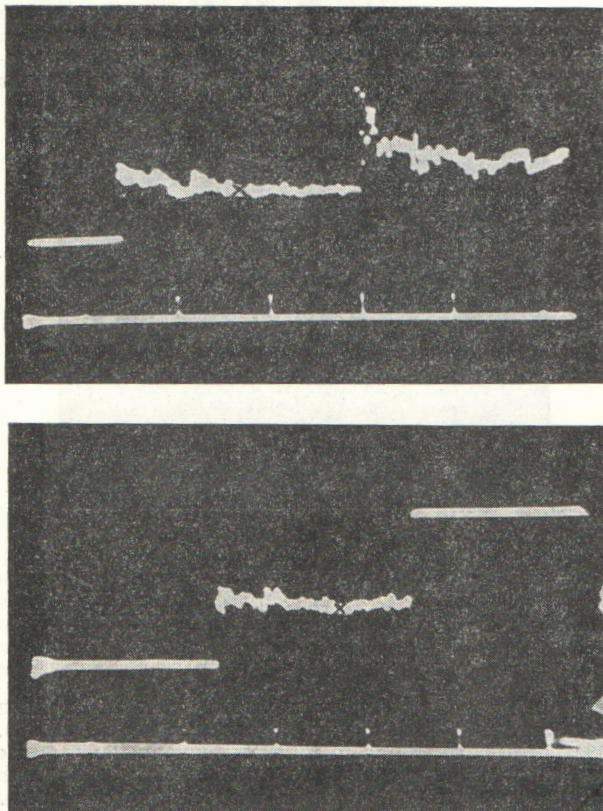


Рис. 3. Осциллограммы сигналов с двух пьезодатчиков, расположенных в различных точках трубы ( $x$  — положение контактной поверхности).

Характерной особенностью осциллограмм сигналов с пьезодатчиков является наличие двух скачков давления, соответствующих двум ударным волнам, которые идут в одном направлении по каналу ударной трубы. Для выяснения причин возникновения второй волны была проведена серия экспериментов, в которых изменялось давление гелия в камере  $p_4$ . В каждом эксперименте определялась скорость первой и второй ударных волн, а также интервал времени между ними.

На основании приведенных экспериментов можно сделать вывод, что с уменьшением  $p_4$  расстояние между первой и второй ударной волной сокращается; при давлении  $p_4 = 1 \text{ атм}$  вторая волна догоняет первую в месте расположения первого датчика. Зная распределение скорости ударной волны по длине трубы (которое измерялось в этих экспериментах) и интервал времени между волнами в точках наблюдения, можно оценить временное расстояние между ними у диафрагмы. Это время уменьшалось от 700 до 550 мксек при понижении давления  $p_4$  от 3 до 1,5 атм. Измеренный полупериод разрядного тока был равен 100 мксек. Сравнение этих времен свидетельствует о том, что возникновение второй ударной волны нельзя объяснить нагревом газа во втором и последующих полупериодах разрядного тока.

Учитывая зависимость характерных времен от давления  $p_4$ , можно предположить, что вторая ударная волна образуется следующим образом. Ударная волна, возникшая в первом полупериоде разряда, отражается от диафрагмы обратно в камеру, затем, вновь отражаясь от ее торца, проявляется в виде второй ударной волны. Уменьшение давления  $p_4$  приводит к увеличению удельного вклада энергии в области разряда, что повышает скорость движения волн в камере высокого давления. Этим можно объяснить тот факт, что при  $p_4 = 1 \text{ атм}$  вторая ударная волна догоняет первую.

В заключение авторы приносят благодарность Н. А. Колокольцову за интерес и внимание к работе, Н. В. Филиппову за полезные советы на ее начальных этапах и Д. С. Дербукову, выполнившему тонкие механические работы.

Поступило в Редакцию 14/IV 1965 г.

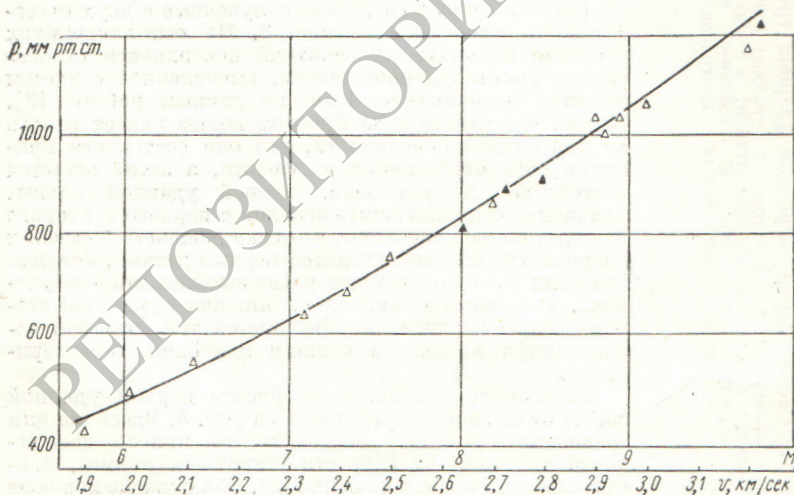


Рис. 4. Зависимость давления на фронте первой ударной волны от ее скорости  $v$  (давление аргона  $p_1 = 10 \text{ мм рт. ст.}$ ):  $\Delta$  — первый пьезодатчик;  $\blacktriangle$  — второй пьезодатчик.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. A. Roshko. Phys. Fluids, 3, 835 (1960).
2. W. Hooker. Phys. Fluids, 4, 1451 (1961).
3. H. Mirels. Phys. Fluids, 6, 1201 (1963).
4. O. Laport, T. Wilkerson. J. Opt. Soc. America, 50, No. 12 (1960).
5. Н. В. Филиппов. В сб. «Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций». Т. III. М., Изд-во АН СССР, 1958, стр. 231.
6. У. Уиллмарт. В сб. «Ударные трубы». М., Изд-во иностр. лит., 1962, стр. 364.
7. Г. Найт. Там же, стр. 374.
8. С. Г. Зайцев. «Приборы и техника эксперимента», № 6, 97 (1958).
9. Е. Реслер, Ш. Ч. Лин, А. Кантровиц. См. [6], стр. 218.