

СИЛЬНЫЕ УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В ВОЗДУХЕ

А. Е. Войтенко

Использование взрывчатых веществ позволяет получать высокотемпературную плазму большой плотности. В статье [1] описано устройство, в котором при разлете плазмы в откачанную трубку были получены высокоскоростные струи. В настоящей работе подобное же устройство (с некоторыми изменениями) использовалось для получения сильных ударных волн в воздухе.

Чертеж применявшегося устройства приведен на рис. 1. Сжимаемый газ 1 находится в камере, образованной медным сферическим сегментом 2, стальным усеченным конусом 3 и алюминиевой пластиной 4. Последняя расположена на заряде взрывчатого вещества 5 с плоским фронтом волны детонации. После подрыва заряда пластина ускоряется по направлению к вершине камеры. При движении пластины газ в камере сжимается несколькими сильными ударными волнами и выходит через отверстие 6 в вершине камеры в трубку 7 в виде высокотемпературной плазмы при большом давлении. Расширяясь затем в трубке, эта плазма вызывает ударную волну в находящемся там газе, играя роль движущегося с большой скоростью поршня. В описываемых опытах в камере и трубке находился воздух при нормальных условиях. Трубка и ка-

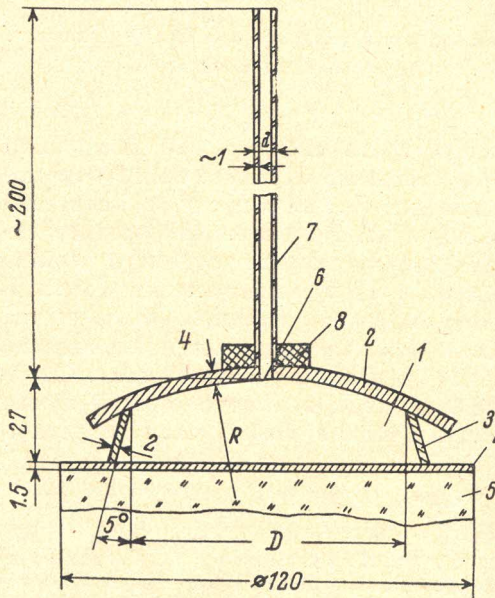


Рис. 1. Устройство для получения ударных волн в воздухе.

Размеры в миллиметрах.

мера соединялись с помощью эпоксидной смолы 8.

Для ускорения сжимающих пластин использовались заряды из сплава 50% тротила—50% гексогена. Искажения формы центральной части пластины 4 при ускорении должны быть невелики. В условиях проведенных опытов отклонения поверхности пластины от средней плоскости были во всяком случае не более 0.5 мм (фактически меньше, но величина их более точно не определялась). Для получения больших скоростей необходимо, таким образом, использовать заряды с хорошо выровненным плоским фронтом волны детонации и пластины с малой разнотолщиной.

Стекло́нная трубка 7 имела толщину стенок около 1 мм. При прохождении ударной волны по воздуху, заполняющему трубку, давление достигало $\sim 10^4$ ата, так что трубка в конечном итоге, разумеется, разрушалась. На фотоснимках, полученных с помощью сверхскорост-

ного фотографирования, фаза разрушения хорошо выявлена. Разрушение наступает приблизительно через одну микросекунду после прохождения фронта ударной волны через данное сечение трубки. Указанное время до разрушения оказывается достаточно большим в том смысле, что в условиях проведенных опытов разрушение трубки практически не сказывается на скорости фронта ударной волны. Об этом свидетельствует результат контрольного опыта, при проведении которого на стеклянную трубку снаружи плотно надевалась металлическая трубка. Скорость ударной волны при этом заметно не изменилась.

Измерялась скорость светящегося фронта ударной волны в воздухе, заполняющем стеклянную трубку, с помощью фотохронографа с вращающимся зеркалом.

Все опыты проводились с одним и тем же начальным расстоянием от пластины до вершины камеры. Одинаковый путь ускорения пластин обеспечивал во всех опытах практически одну и ту же скорость вблизи вершины, равную примерно 5 км/сек.

На рис. 2 приведена зависимость скорости ударной волны в воздухе от радиуса кривизны сферической части камеры (размер R на рис. 1). Во всех опытах измерялась средняя скорость на первых 25 мм движения ударной волны внутри трубки. Варьировать радиус кривизны, не изменяя ни расстояния от пластины до вершины, ни размеров конической части камеры, нельзя. При получении зависимостей, приведенных на рис. 2, неизменными были сохранены расстояние от пластины

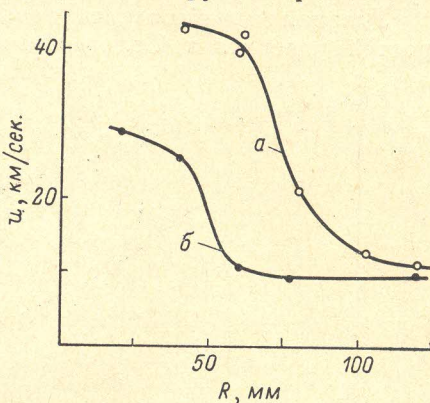


Рис. 2. Зависимость скорости ударной волны u от радиуса кривизны R сферической части камеры для двух различных камер.

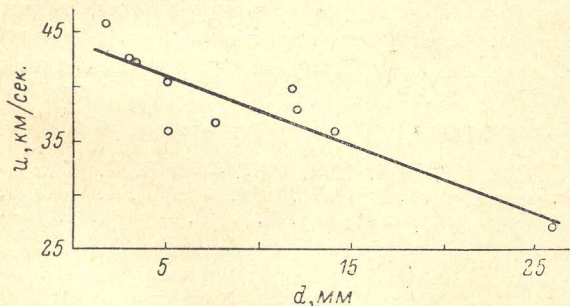


Рис. 3. Зависимость скорости ударной волны u от диаметра выходной трубки d .

конической части которых (размер D на рис. 1) равен соответственно 76 и 40 мм.

Для исследованных камер характерно резкое уменьшение скорости ударной волны, если радиус кривизны сферической части камеры становится больше диаметра ее основания. Аналогичная закономерность имеет место при истечении плазмы в откачанную выходную трубку [1]. Причины уменьшения скорости окончательно не выяснены.

На рис. 3 приведена экспериментальная зависимость скорости ударной волны от внутреннего диаметра трубки (размер d указан на рис. 1). Использование трубок не круглого, а прямоугольного сечения при равной площади существенно скорости не изменяет.

При движении ударной волны вдоль трубки ее скорость плавно уменьшается. На рис. 4 приведена соответствующая зависимость для трубок двух различных диаметров. Скорость в трубке малого диаметра уменьшается быстрее, что, по-видимому, может быть объяснено более существенной ролью трения движущегося газа о стенки в этом случае.

Ударная адиабата для воздуха в рассматриваемом диапазоне скоростей рассчитана Селивановым и Шляпнтохом [2]. Согласно данным

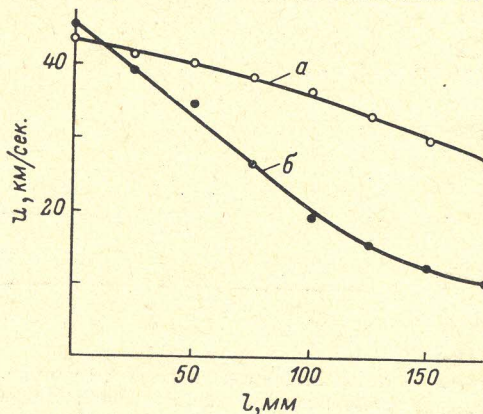


Рис. 4. Зависимость скорости ударной волны u от пути l , пройденного по трубке. Кривые а и б соответствуют внутренним диаметрам трубок 5.1 и 1.9 мм.

этой работы, параметры воздуха, сжатого ударной волной со скоростью 40.6 км/сек. (число Маха ~ 120), таковы: температура $1 \cdot 10^5$ К, давление $1.9 \cdot 10^4$ ата, число частиц $\sim 10^{21}$ в одном кубическом сантиметре, удельная внутренняя энергия $1.56 \cdot 10^5$ кал./г. Ударные волны, получающиеся при взрыве кумулятивных зарядов и движении кумулятивной струи в воздухе при нормальных условиях, имеют заметно меньшую интенсивность [3, 4].

Рассмотрим описываемое устройство с точки зрения кумуляции энергии, т. е. передачи энергии от большой массы взрывчатого вещества к малой массе газа. Эффективность кумуляции можно характеризовать отношением приведенной выше внутренней энергии одного грамма сжатого в ударной волне газа к теплоте, выделяющейся при взрыве одного грамма использованного взрывчатого вещества. Для оценки теплоту, выделяющуюся при взрыве, можно взять среднюю для тротила и гексогена $1.2 \cdot 10^3$ кал./г [3]. Рассматриваемое устройство увеличивает внутреннюю энергию в расчете на единицу массы, таким образом, приблизительно в 130 раз. Если учесть кинетическую энергию движения газа, то указанный коэффициент кумуляции увеличивается примерно в два раза.

Литература

- [1] А. Е. Войтенко. ДАН СССР, 158, № 6, 1278, 1964. — [2] В. В. Селиванов, И. Я. Шляпнтох. Ж. физ. хим., 32, № 6, 670, 1958. — [3] Ф. А. Баум, К. П. Станюкович, Б. И. Шехтер. Физика взрыва. М., 1959. — [4] Н. П. Навиков. ПМТФ, № 1, 3, 1963.

Поступило в Редакцию
10 марта 1965 г.