

В. Е. ФОРТОВ, Ю. В. ИВАНОВ, А. Н. ДРЕМИН,
В. К. ГРЯЗНОВ, В. Е. БЕСПАЛОВ

ВЗРЫВНОЙ ГЕНЕРАТОР НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ

(Представлено академиком Н. Н. Семеновым 12 VIII 1974)

В настоящей работе предлагается динамический метод получения сильнонеидеальной плазмы, основанный на сжатии и необратимом разогреве газов во фронте мощной ионизирующей ударной волны.

Для выбора оптимальных условий и оценки возможностей ударно-волнового эксперимента были предприняты расчеты параметра неидеальности $\Gamma = e^2/kTr$ (r — дебаевский радиус экранирования) плазмы, образующейся за фронтом плоской стационарной ударной волны, распространяющейся в аргоне и ксеноне при повышенных начальных давлениях P_0 (рис. 1). При этом для описания плазменного взаимодействия использовалась дебаевская теория* в большом каноническом ансамбле⁽²⁾ ввиду ее приемлемых экстраполяционных свойств в области $\Gamma \sim 1$ ⁽³⁾. Расчеты показали (рис. 1), что оптимальные (в смысле значительных Γ) условия эксперимента соответствуют скоростям ударных волн в Хе на уровне $D \sim 5 \cdot 10^5$ см/сек и в Аг $D \sim 9 \cdot 10^5$ см/сек. Для реализации этого диапазона скоростей необходим высокоэнтальпийный источник ударных волн, в качестве которого в данной работе использовались продукты детонации конденсированного в.в.

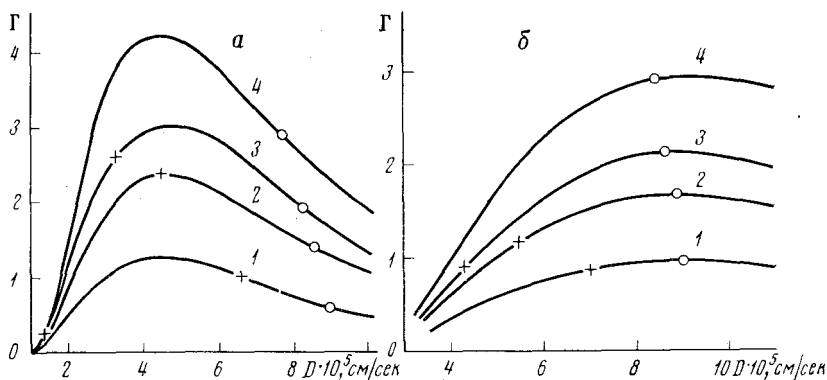


Рис. 1. Параметр неидеальности Γ на ударной адиабате Хе (а) и Аг (б) при различных начальных давлениях P_0 (бар): 1 — 1, 2 — 5, 3 — 10, 4 — 25

Разработанный взрывной генератор неидеальной плазмы представляет собой ударную трубу, в которой ударная волна образуется при расширении в исследуемый газ продуктов детонации гепсогена (удельная энергоёмкость $\sim 10^4$ дж/см³). Исходные для распада разрыва параметры «поршня» соответствуют условиям Чепмена — Жуке: давление ~ 300 кбар, плотность $\sim 2,3$ г/см², массовая скорость $\sim 2,1 \cdot 10^5$ см/сек⁽⁴⁾. Использование спе-

* Расчет по иным теориям плазменной неидеальности незначительно изменяет оптимальные значения D (рис. 1).

циальным образом профилированной линзы и выбор соответствующей длины заряда в.в. обеспечивали минимальную (не хуже 50 см) кривизну и стационарность параметров детонационного фронта при его выходе из заряда в исследуемый газ. Полное энерговыведение в каждом эксперименте составляло $\sim 3 \cdot 10^6$ дж на уровне мощности $\sim 10^{11}$ вт, что приводило, разумеется, к уничтожению всего устройства и к необходимости работы в специально защищенных помещениях с соблюдением соответствующих мер безопасности.

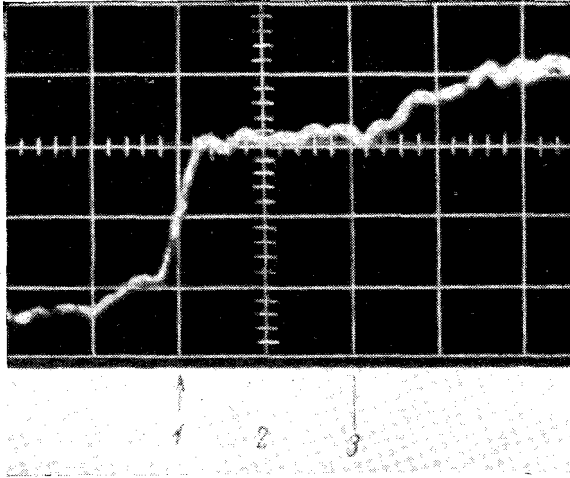


Рис. 3. Рентгенограмма ударно-сжатой плазмы. Развертка — $2,5 \cdot 10^{-6}$ сек/см. 1 — фронт ударной волны, 2 — плазма, 3 — продукты детонации

Скорость фронта ударной волны в исследуемых газах регистрировалась оптическим и электроконтактным методами. Результаты измерений вблизи среза заряда при различных начальных давлениях отмечены кружками на рис. 1, они характеризуют газодинамические возможности данного устройства. Крестиками на рис. 1 отмечены скорости D на расстоянии $l=25$ см по длине канала. Таким образом, оптимальные или близкие к ним условия эксперимента реализуются путем организации простой линейной газодинамики эксперимента, что позволило отказаться от применения более сложных кумулятивных методов (^{5, 6}).

Исследование структуры потока за фронтом ударной волны показало, что его одномерность обеспечивается инерциальным удержанием плазмы массивными стеклянными стенками канала. Развиваемые за фронтом ударной волны давления оказываются порядка нескольких килобар, что превосходит предел прочности стекла. Однако, ввиду значительной массы стенок, скорость их бокового разлета оказывается чрезвычайно низкой (по измерениям $\approx 2 \cdot 10^3$ см/сек), так что за время движения плазмы смещение стенок мало и не приводит к заметному расширению потока. Общий характер течения плазмы в генераторе иллюстрирует рис. 2, где представлена мгновенная фотография работы устройства. Видно, что фаза заметного разрушения канала наступает за ярко светящейся плазменной пробкой в зоне действия продуктов детонации. Отметим, что подобные эффекты наблюдались и на кумулятивной ударной трубе (⁵) (рис. 2 см. вкл. к стр. 1305).

Малые (доли миллиметра) пробеги светового излучения в ударно-сжатой плазме не позволяют использовать оптические методы исследования картины течения за фронтом ударной волны. Поэтому использова-

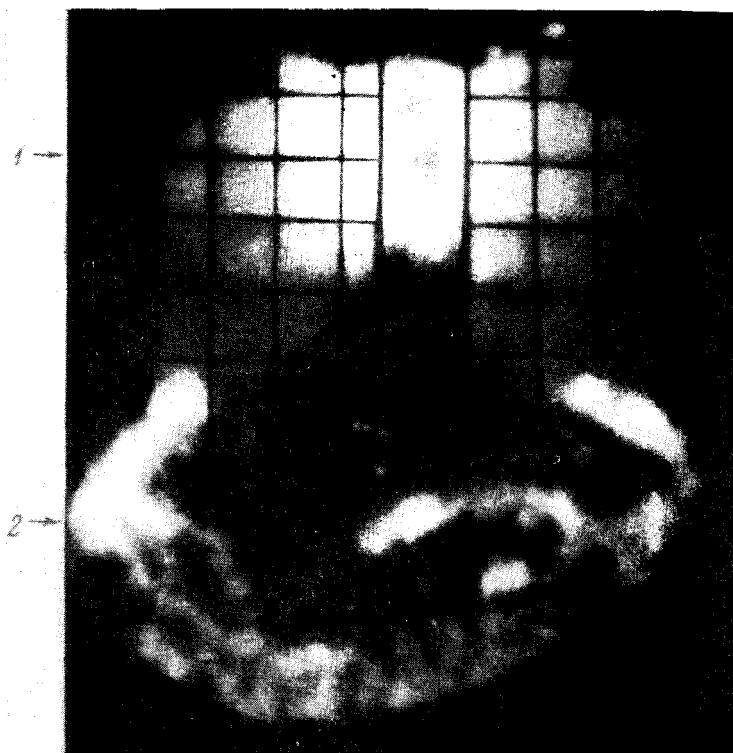


Рис. 2. СФР-грамма работы взрывного генератора. 1 — ударно-сжатая плазма, 2 — продукты детонации гексогена. Размер реперной сетки — 5 см

Таблица 1

Газ	P_0 , бар	$D \cdot 10^{-5}$, см/сек	$P \cdot 10^3$, бар	$\rho \cdot 10^{-1}$, г/см ³	$T \cdot 10^{-3}$, °К	$n_e \cdot 10^{-20}$	Γ
Ar	5	6,51	3,05	0,6	21,2	1,6	1,72
	15	4,92	4,84	1,3	16,5	1,0	1,45
Xe	5	5,1	6,5	2,6	26,4	8,0	2,2
	15	4,0	13,0	6,7	23,0	14,2	3,4

ли метод импульсной рентгенографии⁽¹⁾, основанный на регистрации прошедшего через плазму рентгеновского излучения с длиной волны $\sim 0,3 \cdot 10^{-8}$ см. Осциллограмма профиля плотности приведена на рис. 3, где виден резкий фронт ударной волны и область постоянной плотности за ним. Измеренная величина сжатия в ударной волне находится в соответствии с термодинамическим расчетом⁽²⁾, а размер плазменной пробки соответствует обычным для ударных труб оценкам.

Характерные параметры плазмы, достижимые во взрывном генераторе ($l=15$ см), приводятся в табл. 1. Они вычислены в соответствии с⁽²⁾ по измеренной скорости фронта ударной волны.

Отделение Института химической физики
Академии наук СССР
Черноголовка Московской обл.

Поступило
7 VIII 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер, Физика ударных волн и высокотемпературных газодинамических явлений, «Наука», 1966. ² В. К. Грязнов, И. Л. Иосилевский, В. Е. Фортов, Журн. прикл. мех. и техн. физ., в. 3, 70 (1973). ³ Б. Н. Ломакин, В. Е. Фортов, ЖЭТФ, т. 63, 92 (1972). ⁴ А. Н. Дремин, С. Д. Савров и др., Детонация конденсированных взрывчатых веществ, «Наука», 1970. ⁵ А. Е. Войтенко, ЖТФ, т. 36, 178 (1966). ⁶ W. K. Warren, C. J. Harris, In: Proc. of the VII Intern. Shock Tubes Symp., Toronto, 1968. ⁷ Б. Н. Ломакин, В. Е. Фортов, Теплофиз. высоких температур, т. 9, 1291 (1971).