АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР
Том 10 1972 № 5

УДК 533.951

ИМПУЛЬСНАЯ РЕНТГЕНОГРАФИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ПАРАХ ЦЕЗИЯ НА ДВУХ РЕНТГЕНОВСКИХ ТРУБКАХ

В. А. Сеченов, О. Е. Щекотов

Приведено описание аппаратуры и методики измерения плотности и скорости ударной волны по поглощению мягкого рентгеновского излучения с помощью двух рентгеновских трубок. Особое внимание обращено на точность метода определения плотности. Указаны возможные источники ошибок и методы их устранения. Точность определения плотности при оптимальных условиях, реализуемых в эксперименте, составляет 3%.

В работах [1—4] и в диссертации К. И. Серякова * рассмотрен вопрос получения и исследования плотной неидеальной цезиевой плазмы на подогреваемой ударной трубе. Показана возможность построения уравнения состояния $P = P(\rho, T)$ по совокупности экспериментальных данных в некоторой области (P, ρ) (P, ρ, T — давление, плотность, температура в ударной волне соответственно). Варьирование достигалось изменением начальных условий: температуры T_0, давления паров цезия P_0, давления гелия в камере высокого давления P_4. В экспериментах T_0 измерялась термопарой, P_0 — жидкостным манометром, с использованием буферного инертного газа, скорость фронта ударной волны u — фотоумножителями, регистрирующими скачок плотности за фронтом падающей и отраженной ударных волн; ρ определялась по поглощению мягкого рентгеновского излучения в ударной волне [4, 5]. В предлагаемой работе приняты рекомендации [4, 5], а также отмечены некоторые особенности, присущие используемой аппаратуре и геометрии расположения источника и приемника рентгеновского излучения.

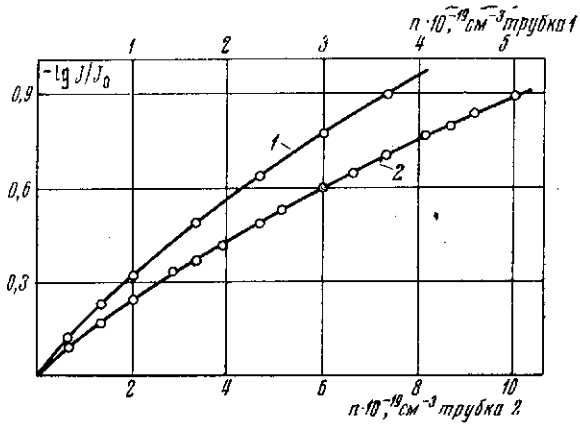

Рис. 1. Экспериментальные тарировочные зависимости поглощения рентгеновского излучения от концентрации ксенона. Напряжение при тарировке на трубке *I* — 20 *кв*, на трубке *II* — 32 *кв*

Источники ошибок. Ошибка определения плотности состоит из трех независимых слагаемых: инструментальной ошибки $(\Delta\rho/\rho)_1$ включающей статистическую неопределенность [5], и конечную толщину линии, затрудняющих расшифровку осциллограммы; ошибки, связанной с неточ-

* К. И. Серяков. Канд. дис., ИВТАН, М., 1968.

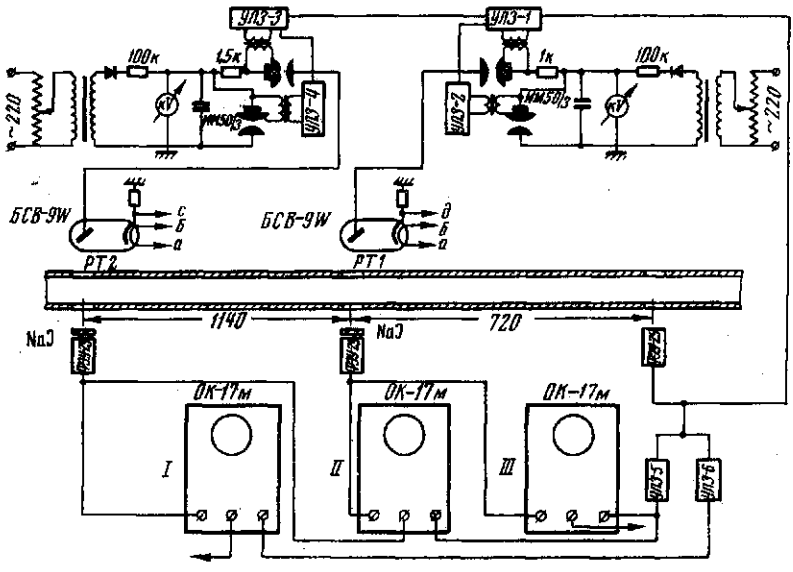

Рис. 2. Блок-схема аппаратуры для рентгеновских измерений.

На осциллографах *I* и *III* измеряется плотность в сечении трубок РТ *1* и РТ *2* и ток через рентгеновские трубки. На осциллографе *II* измеряется скорость ударной волны

ностью определения напряжения на аноде рентгеновской трубки в момент прохождения ударной волны $(\Delta\rho/\rho)_2$; ошибки тарировки $(\Delta\rho/\rho)_3$. Из тарировочных кривых (рис. 1) видно, что зависимость поглощения от плотности в ударной волне может быть с достаточной точностью интерполирована функцией $J = J_{01}e^{-\mu\rho x}$; J_{01}, J — амплитуда рентгеновского сигнала, попадающего на приемник до и во время прохождения ударной волны; μ — массовый коэффициент поглощения; x — диаметр рабочего канала. Отсюда получим

$$(\Delta\rho/\rho)_1 = [\Delta J/J_{01}(1 + J/J_{01})]/[J/J_{01}\ln J/J_{01}]. \qquad (1)$$

Погрешность ΔJ включает половину толщины линии, а также амплитуду статистической пульсации. Минимум ошибки $(\Delta\rho/\rho)_1$ равен $3{,}57\cdot(\Delta J/J_{01})$ при $J/J_{01} = 0{,}28$. Ошибка из-за неточного определения напряжения V_a на аноде рентгеновской трубки в момент прохождения ударной волны связана с тем, что осциллограммы изменения рентгеновского сигнала с приемника рентгеновского излучения затем переводятся в соответствующие изменения плотности при помощи тарировочной кривой $\lg(J/J_0)_{V=V_a} = f(\rho)$, а так как $\mu \sim 1/V^3$, получим

$$(\Delta\rho/\rho)_2 = 3\Delta V/V. \qquad (2)$$

Тарировка проводится в непрерывном режиме работы рентгеновской трубки и напряжение анода равно напряжению зарядного устройства. Измерение же плотности ударной волны проводится в импульсном режиме при токах трубки 0,5—1 *а*. При этом становится существенным падение напряжения на ограничительном сопротивлении и разрядном промежутке, которое должно учитываться при обработке осциллограмм поглощения. При тарировке необходимо поддерживать постоянным уровень рентгеновского излучения J_0, а также должны оставаться неизменными геометрия расположения источник — поглотитель — приемник и спектр рентгеновской трубки [5]. Ошибка тарировки была получена экспериментально и обсуждается ниже.

Аппаратура и методика измерений. Блок-схема аппаратуры для рентгеновских измерений представлена на рис. 2. С целью получения минималь-

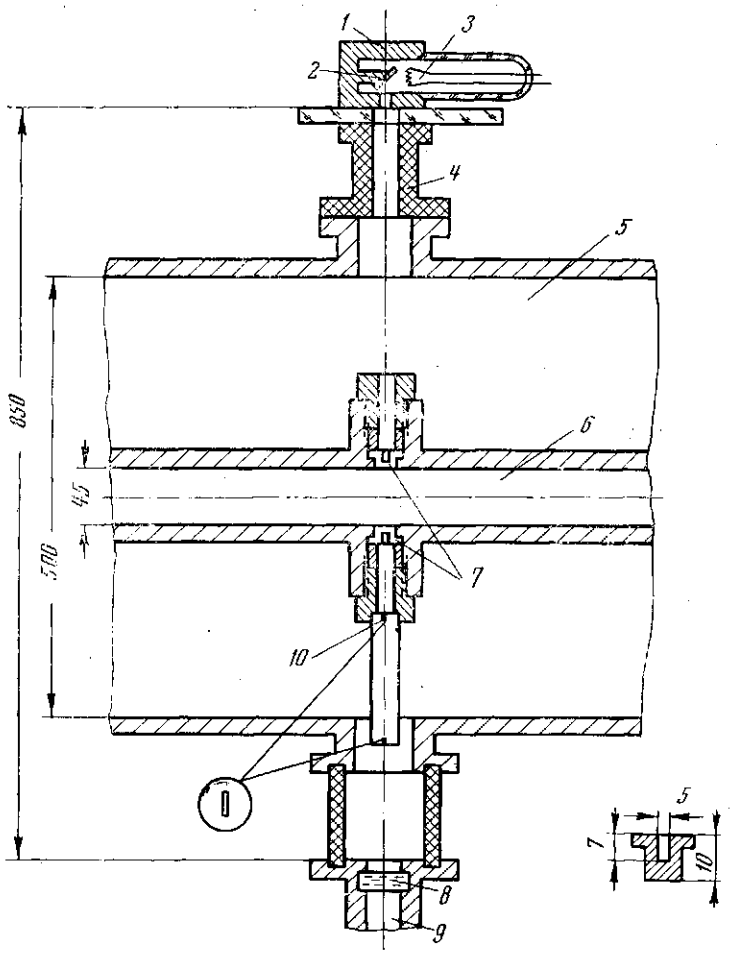

Рис. 3. Схематический разрез ударной трубы и рентгеновской трубки с приемником:

1 — трубка БСВ-9 W; *2* — анод; *3* — катод; *4* — текстолитовый переходник; *5* — обогреватель; *6* — ударная труба; *7* — бериллиевые заглушки; *8* — сцинтиллятор NaJ; *9* — ФЭУ-29; *10* — диафрагма, $h = 5$ *мм*, $\delta = 1{,}5$ *мм*

ной инструментальной ошибки $(\Delta\rho/\rho)_1$ при измерении плотности прямой и отраженной ударных волн использовались две рентгеновские трубки, работающие при различных напряжениях анода, таких, чтобы $(J/J_{01}) \simeq 0{,}3$. Из-за наличия обогревателя источник и приемник должны размещаться на значительном расстоянии (рис. 3). Для уменьшения статистической пульсации применяется трубка с максимальным квантовым выходом анода БСВ9-W. Ток трубки при напряжении 20—32 *кв* в импульсном режиме составляет 0,5—1 *а*. Кроме того, перед запуском проводится нацеливание трубки по максимуму сигнала с приемника излучения. Приемником излучения служит ФЭУ-29 со сцинтиллятором NaJ. Для уменьшения паразитного поглощения защитная алюминиевая крышка сцинтиллятора заменяется бериллиевой фольгой. Сигнал с ФЭУ через усилитель с катодным повторителем, собранным на лампе 6Н6П, подается на осциллограф ОК-17М через емкостный фильтр, сглаживающий статистическую пульсацию. С целью уменьшения инструментальной ошибки из-за конечной толщины линии осциллографы ОК-17М, регистрирующие рентгеновские сигналы в сечениях прямой и отраженной ударных волн, были переделаны. Линейность амплитуды доведена до 45 *мм*. Пусковым сигналом служит сигнал

с ФЭУ, регистрирующего световое излучение ударной волны. Этот сигнал, проходя через блоки задержек (УЛЗ), осуществляет синхронизацию запусков осциллографов и разряда конденсаторов ИМ50/3 через рентгеновские трубки. Для меньшего изнашивания анодов трубок отдельные блоки задержек осуществляют разряд конденсаторов на землю после прохождения ударной волны. Сигналы поглощения используются также для измерения скорости ударной волны. Измерение скорости ударной волны по поглощению рентгеновского излучения обладает по сравнению с измерением скорости по световому излучению тем преимуществом, что в первом случае не надо заботиться о линейности амплитуды сигнала с ФЭУ, регистрирующего свет из ударной волны. Достаточно большая крутизна фронта поглощения ~ 1 *мксек* позволяет определять скорость на базе $\geqslant 20$ *см* с точностью $\sim 1\%$.

В эксперименте измеряется ток через трубку и напряжение на аноде. Ток определяется по амплитуде импульса с сопротивления 1 *ом* в цепи катода трубки. Напряжение снимается с делителя на сопротивлениях и подается на пластины электронно-лучевой трубки осциллографа ОК-17М. После каждого эксперимента производится калибровка напряжения. Для этого на пластины подается постоянное напряжение, измеренное цифровым вольтметром Щ1412 и фотографируется. Наибольшая ошибка в этом методе регистрации напряжения определяется конечной толщиной линии. При хорошей фокусировке и большей величине сигнала точность определения напряжения составляет $\sim 0{,}5\%$.

Тарировка. Концентрация атомов и ионов цезия $n_a + n_i$ в ударной волне достигает $(10^{19}-10^{20})$ *см*$^{-3}$. Получение таких концентраций атомов в парах цезия связано с температурой нагрева ($\sim 1000°$ С) и на данной установке не представляется возможным. Поэтому для тарировки использовался ксенон. Разница в поглощении оценивается по формуле $(Z_{Cs}/Z_{Xe})^{4,3}$ [6] и составляет 6% (Z — заряд атома). Ксенон заполняет рабочий канал при давлениях (0—3000) *мм рт. ст.* до 1300 *мм рт. ст.*, давление измеряется жидкостным манометром, заполненным тетрабромэтаном, при большем давлении отсчет проводится по образцовому манометру (0—6) *атм.* Точность определения давления выше 0,5%. При тарировке рентгеновская трубка работает в непрерывном режиме при токе 0,2 *ма*. Контроль за величиной тока через рентгеновскую трубку осуществляется с помощью милливольтметра М-95, включенного параллельно сопротивлению в катоде трубки. Рентгеновское излучение регистрируется микроамперметром М-95, включенным последовательно с анодом ФЭУ. Напряжение рентгеновских трубок устанавливается с помощью киловольтметров С-195, С-100 и в процессе тарировки практически не меняется. В качестве источника напряжения ФЭУ применяется выпрямитель ВС-22, обеспечивающий необходимую стабильность. При постоянстве тока и напряжения рентгеновской трубки интенсивность рентгеновского излучения также постоянна с точностью $\pm 1\%$. Для поддержания тока рентгеновской трубки постоянным в процессе тарировки необходимо увеличивать ток накала, иначе ток рентгеновской трубки монотонно падает. Падение тока при постоянной мощности катода, по-видимому, связано с гажением анода, так как при достаточно длительной работе трубки в непрерывном режиме наступает пробой. После тарировки при переходе к импульсному режиму ток трубки резко падает и приходится производить «ионную откачку» (10—15 импульсных разрядов до выхода рентгеновского сигнала на максимальный уровень). В промежутках между отсчетами ВС-22 отключается, чтобы избежать явление утомления [6]. Методические исследования показали, что в принятой геометрии расположения источник — поглотитель — приемник необходимо сильно диафрагмировать рентгеновское излучение (рис. 3). В противном случае при различных ориентациях источника и приемника тарировочные кривые, снятые при одном и том же напряжении V_a, не

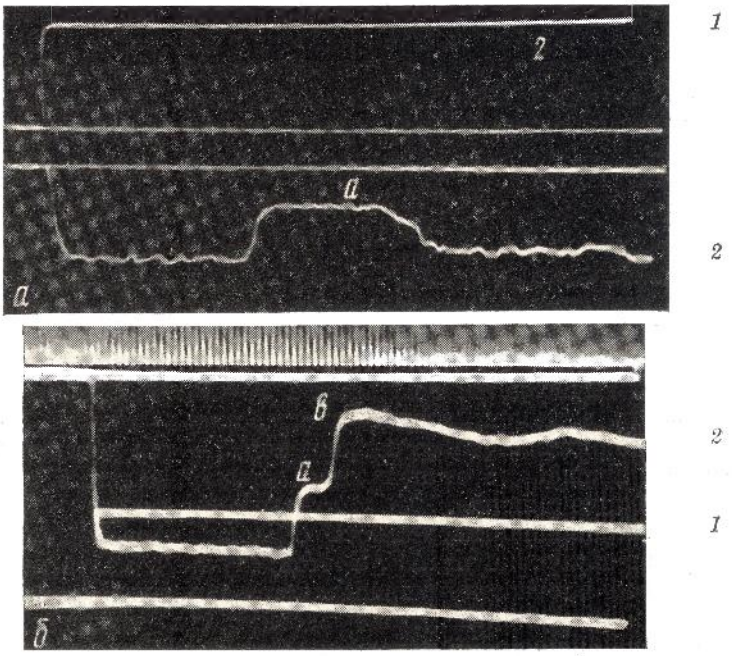

Рис. 4. Осциллограмма поглощения рентгеновского излучения за фронтом ударной волны в сечениях *РТ 1* (*а*) и *РТ 2* (*б*):

1 — ток рентгеновской трубки; *2* — рентгеновский сигнал, *а* — скачок плотности за фронтом падающей ударной волны, *b* — скачок плотности за фронтом отраженной ударной волны. *а*: $T_0 = 858°$ К, $P_0 = 0{,}38$ *атм*; $(n_a + n_i) = 1{,}75 \cdot 10^{19}$ *см*$^{-3}$, $u = 1{,}54$ *км/сек*; *б*: $\nu = 100$ *кгц*; $T_0 = 858°$ К; $P_0 = 0{,}38$ *атм*; $(n_a + n_i)_{\text{пад}} = 1{,}78 \cdot 10^{19}$ *см*$^{-3}$; $(n_a + n_i)_{\text{отр}} = 7 \cdot 10^{19}$ *см*$^{-3}$; $u = 1{,}54$ *км/сек*

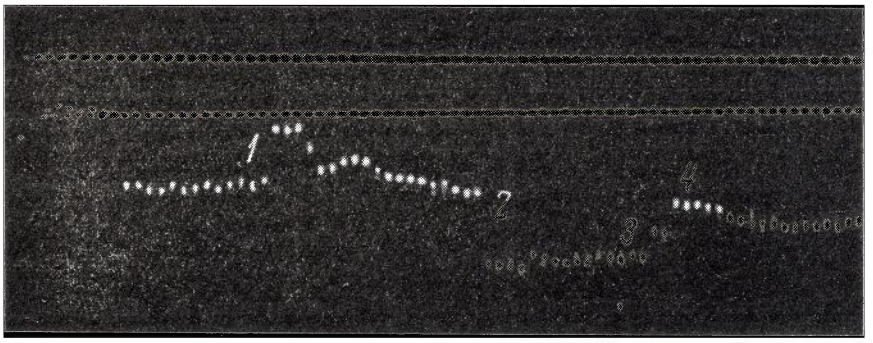

Рис. 5. Осциллограмма измерения скорости ударной волны по рентгеновскому поглощению в сечениях *РТ 1* и *2*:

1 — скачок плотности за фронтом падающей волны в сечении *РТ 1*; *2* — момент включения *РТ 2*; *3* — скачок плотности за фронтом падающей волны в сечении *РТ 2*; *4* — скачок плотности за фронтом отраженной волны в сечении *РТ 2*; метки 20 *мксек*; $u = 1{,}68$ *км/сек*

совпадают, отличие достигает 15%. Причина состоит в том, что при различных ориентациях источника и приемника рентгеновское излучение проходит под разными углами через систему бериллиевых окон рабочего канала. В результате меняется спектр излучения, что приводит к различию тарировочных кривых. Жесткое крепление оказалось малоэффективным, так как при нагреве до 600° С неизбежна деформация направляющих каналов. Кроме того, такое крепление вызывает нежелательный градиент температур вдоль рабочего канала.

Диафрагмирование, а также нацеливание рентгеновских трубок на максимальный сигнал с приемника уменьшают ошибку тарировки до 1%.

Обработка результатов. На рис. 4 и 5 представлены осциллограммы поглощения, используемые для определения плотности прямой и отраженной ударных волн в Cs, а также определения скорости. Так как поглощение не является строго экспоненциальным, плотность в ударной волне находится из тарировочной кривой с учетом поправки в 6%

$$\lg (J / J_0) = f(s)$$

и тождества

$$\lg (J / J_0) = \lg (J / J_{01}) + \lg (J_{01} / J_0),$$

где J_0 — интенсивность излучения в отсутствие паров цезия. Первое слагаемое определяется из осциллограммы поглощения, второе находится по измеренной начальной плотности паров цезия ρ_0 и тарировочной кривой. Напряжение на аноде рентгеновской трубки в момент прохождения ударной волны вычисляется по формуле $V = V_1 e^{\tau i / V_1 C}$, здесь V_1 — напряжение на аноде в момент разряда конденсатора емкости C на землю, определяемое по осциллограмме напряжения; i — ток рентгеновской трубки, τ — время, прошедшее от появления ударной волны в сечении рентгеновской трубки до гашения.

Как правило, вычисленное таким образом напряжение отличается от напряжения тарировки на ΔV. В этом случае к полученной по тарировочной кривой плотности ρ прибавляется поправка, равная $3\rho\Delta V / V$.

Обсуждение результатов. Выше рассмотрены различные источники ошибок, а также оценены их вклады в общую ошибку определения плотности. В настоящей работе аналогично [4, 5] была проведена экспериментальная проверка полной ошибки измерения. Для этого измерялись скорость и плотность ударной волны, распространяющейся в ксеноне. Отличие измеренных значений плотности от вычисленных по скорости и начальным условиям P_0, T_0 не превышает 3%. Например, в эксперименте с ксеноном $T_0 = 858°$ K, $P_0 = 0{,}72$ *атм*; $u = 1{,}64$ *км/сек*; $(n_a + n_i)_{\text{эксп}} = 2{,}28 \cdot 10^{19}$ *см*$^{-3}$; расчетное значение $(n_a + n_i)_{\text{теор}} = 2{,}32 \cdot 10^{19}$ *см*$^{-3}$. Наличие двух рентгеновских трубок, работающих в разных режимах, позволяет провести относительную проверку методики измерения плотности. При одинаковых скоростях ударной волны в сечениях *РТ 1* и *2* плотности падающей ударной волны совпадают с точностью $\sim 3\%$.

Авторы выражают благодарность Б. Н. Ломакину и Ю. Г. Красникову за большую помощь в работе и полезные консультации.

Московский физико-технический институт

Поступила в редакцию 19 I 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. Зайцев. Исследования по физической газодинамике, 30. «Наука», 1966.
2. Б. Н. Ломакин, В. Е. Фортов, О. Е. Щекотов. Теплофизика высоких температур, 8, № 1, 1970.
3. Ю. Г. Красников, В. Е. Фортов. Ж. эксперим. и теор. физ., 59, № 5, 1970.
4. Б. Н. Ломакин, В. Е. Фортов. Теплофизика высоких температур, 10, № 6, 1971.
5. Г. Найт, Д. Венейбл. Сб. Ударные трубы. Изд. иностр. лит., 1962, стр. 378.
6. М. А. Блохин. Физика рентгеновских лучей. ГИТТЛ, 1957.