ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР, 1993, том 31, № 1.

УДК 533.932

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ЦЕЗИЕВОЙ ПЛАЗМЫ НА ПОДОГРЕВАЕМОЙ УДАРНОЙ ТРУБЕ

© 1993 г. А. А. Боржиевский, В. А. Сеченов, В. И. Хорунженко

Физико-технический институт, г. Долгопрудный

Поступила в редакцию 24.06.92 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований электропроводности цезиевой плазмы на подогреваемой ударной трубе. Подробно анализируется влияние образования конденсата цезия из пробки ударной волны на стенках измерительного узла. Данные по электропроводности цезиевой плазмы получены в диапазоне параметров: $T = (2.3 - 6.7) \times 10^3$ K; $P = 0.05 - 0.9$ МПа.

Неидеальная цезиевая плазма привлекает к себе внимание главным образом в связи с разработкой ряда перспективных энергетических проектов. Несмотря на значительные усилия различных экспериментальных групп, до настоящего времени не исследована электропроводность цезия вдоль фазовой границы жидкость–пар в диапазоне температур $1.2 \times 10^3 < T < 1.4 \times 10^3$ K. Мало исследована область параметров $1.4 \times 10^3 < T < 4.5 \times 10^3$ K. В большей части работ неизвестной остается точность измерений электропроводности цезия. Это связано с тем, что в экспериментах на установках статического типа необходимо учитывать влияние на результаты абсорбированной пленки цезия на поверхности измерительного устройства. В импульсных экспериментах необходимо дополнительно учитывать образование пленки конденсата цезия. Неучет этих обстоятельств может привести к завышенной величине электропроводности цезия.

Особенности измерения электропроводности цезиевой плазмы на подогреваемой ударной трубе (ПУТ)

Основной проблемой, затрудняющей исследование на ПУТ свойств цезиевой плазмы, является возможность конденсации цезия из пробки ударной волны на стенки измерительного устройства. Скорость конденсации зависит от нескольких причин: наличия в цезии примеси неконденсирующегося газа, пористости поверхности керамики измерительного устройства и степени ее чистоты, начального парциального давления паров цезия. В [1] было установлено, что при добавлении в цезиевый пар инертного газа (при давлении, равном 1% от парциального давления цезия) скорость конденсации уменьшается на несколько порядков величин. Большая пористость керамики приводит к сильной металлизации ее поверхности цезием, зависящей от парциального давления паров цезия. Это явление сильно увеличивает скорость конденсации цезия из пробки ударной волны на поверхность керамики. Указанные обстоятельства значительно затрудняют исследование электропроводности цезиевой плазмы на ПУТ.

В предлагаемой работе для измерения электропроводности цезиевой плазмы на ПУТ использовался метод добротности колебательного контура. В этом методе, как было показано в [2], влиянием конденсата на измерение проводимости плазмы можно пренебречь, если выполняется условие

$$\Delta \ll \frac{1}{8}\frac{\sigma_{пл}}{\sigma_{кн}} D,$$

где Δ – толщина слоя конденсата, D – внутренний диаметр катушки контура, $\sigma_{кн}$ – проводимость конденсата, $\sigma_{пл}$ – проводимость плазмы.

Следовательно, для проведения корректных измерений на ПУТ электропроводности цезиевой плазмы по методу добротности колебательного контура необходима разработка способов уменьшения толщины пленки конденсата и прямого контроля его влияния на результаты измерений.

Экспериментальное исследование электропроводности цезиевой плазмы на ПУТ

В экспериментах на подогреваемой адиабатической трубе на смеси цезия с инертным газом была исследована зависимость уменьшения скорости конденсации цезия с ростом мольной доли инертного газа в смеси [3]. Уменьшение скорости конденсации цезия объясняется тем, что при сжатии смеси перенасыщенный пар цезия выпадает из пристеночной области в виде конденсата на стенки измерительного узла. В последующие моменты времени скорость выпадения конденсата определяется скоростью диффузии цезия из ядра потока на стенку через пристеночный слой инертного газа. Кроме того, в экспериментах на

подогреваемой адиабатической трубе было установлено, что скорость испарения конденсата на несколько порядков величин меньше скорости выпадения конденсата.

С учетом указанных обстоятельств в данной работе для измерения электропроводности цезиевой плазмы на ПУТ был разработан и изготовлен измерительный узел, схема которого представлена на рис. 1. Он состоит из керамического цилиндра 1, выполненного из окиси алюминия, с внутренним диаметром, равным диаметру ударной трубы, катушки индуктивности колебательного контура 2 и электронной схемы регистрации электропроводности 3. В отличие от [4], в данной работе предусмотрено значительное увеличение добротности колебательного контура. С этой целью была разработана электронная схема, в которой катушка индуктивности является одним из задающих элементов автогенератора. Для измерения с хорошей точностью электропроводности плазмы в широком диапазоне параметров в схеме предусмотрено изменение частоты автогенератора в интервале 0,5 - 6 МГц. Для измерения малых значений проводимости ($\sigma \leq$ ≤ 100 См/м), наряду с автогенератором, в схеме используется также компенсационный блок, с помощью которого регистрируется не амплитуда сигнала, а ее изменение при прохождении ударной волной измерительного объема.

Измерительный узел устанавливается на подогреваемой ударной трубе [5]. Элементы измерительного узла подобраны таким образом, чтобы исключить разгерметизацию ударной трубы при ее нагреве до рабочих температур. Перед началом эксперимента проводится тарировка измерительного узла графитовыми образцами известной проводимости. В области проводимостей $\sigma = 5$ - 30 См/м для тарировки используются электролиты. В ходе эксперимента проводится нагрев установки до температуры 600°С. Это приводит к увеличению активного сопротивления катушки и, соответственно, уменьшению добротности контура. Для того чтобы избежать этого явления, параллельно контуру подсоединяется регулируемое сопротивление (R на рис. 1), с помощью которого активное сопротивление контура поддерживается одинаковым до нагрева и после выхода установки на заданный температурный режим. Для проверки возможности использования измерительного узла в сложных условиях экспериментов на ПУТ ($t_{нач}$ = 600° С и импульсные нагрузки до 20 МПа) и определения точности измерения электропроводности плазмы были проведены измерения электропроводности ксеноновой плазмы. Установлено совпадение экспериментальных и расчетных значений с точностью ±20%.

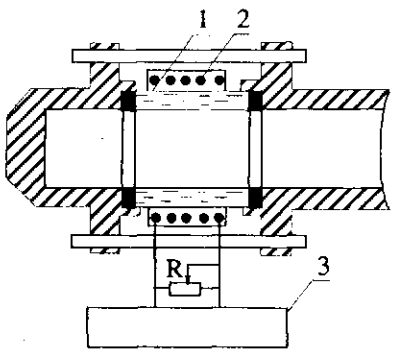

Рис. 1. *Измерительный узел: 1 – керамический цилиндр; 2 – катушка индуктивности; 3 – электронная схема.*

При проведении исследований параметров цезиевой плазмы на ПУТ, после нагрева установки до рабочих температур, камера низкого давления ударной трубы заполняется смесью пара цезия и аргона, содержащейся в цезиевом кране. Парциальное давление аргона во всех экспериментах устанавливается одинаковым, а давление цезия варьируется изменением температуры подогрева установки. Через 30 - 40 мин после открытия цезиевого крана проводится регистрация начальных параметров (давления и температуры смеси). В течение всего указанного времени контролируется амплитуда сигнала с электронной схемы. Установлено, что при начальном давлении паров цезия $P_0 \geq 0.03$ МПа амплитуда сигнала уменьшается. Это явление связано с металлизацией внутренней поверхности керамического цилиндра. При меньших начальных давлениях амплитуда сигнала с контура не изменяется.

В экспериментах регистрируются начальные параметры, скорость фронта падающей ударной волны, плотность плазмы за падающей ударной волной и осциллограмма электропроводности. Интенсивность ударной волны варьируется изменением начального давления паров цезия, давлением и родом толкающего газа (гелий или аргон). Для определения плотности плазмы используется рентгеновская диагностика [6]. По экспериментальным данным, используя законы сохранения на фронте ударного разрыва, рассчитывается давление и энтальпия плазмы.

На рис. 2 представлены осциллограммы электропроводности цезиевой плазмы. Осциллограмма (рис. 2а) получена при начальном давлении паров цезия 3.1×10^{-2} МПа (мольная доля аргона в смеси 1%). Из осциллограммы определяются: амплитуда сигнала до прихода ударной волны а (переходная область б соответствует заполнению плазмой объема керамического цилиндра и образованию конденсата цезия на внутренних стенках измерительного узла), амплитуда сигнала, соответствующая плазме и конденсату цезия за фронтом падающей ударной волны в, амплитуда сигнала, соответствующая конденсату цезия после прохождения контактной поверхностью измерительн-

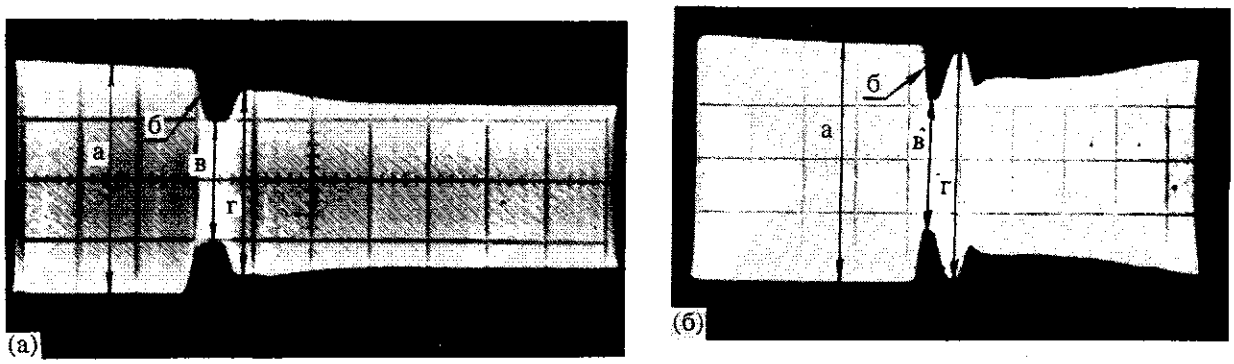

Рис. 2. *Осциллограммы электропроводности цезиевой плазмы за падающей ударной волной.*

ной области г. Имея указанную осциллограмму и соответствующую тарировочную зависимость, можно определить электропроводность цезиевой плазмы за фронтом падающей ударной волны. Точность определения с учетом погрешности построения тарировочной зависимости и влияния на результаты измерений конденсата цезия за фронтом падающей ударной волны составляет ±50%.

Осциллограмма (рис. 2б) получена при начальном давлении паров цезия 6.8×10^{-3} МПа (мольная доля аргона в смеси 5%). Хорошо видно, что после прохождения контактной поверхностью измерительной области амплитуда сигнала практически возвращается на начальный уровень. Это свидетельствует о малой толщине пленки конденсата в указанном эксперименте.

Следовательно, уменьшая начальное давление паров цезия и увеличивая мольную долю аргона в смеси, можно значительно уменьшить толщину слоя конденсата и практически устранить его влияние на результаты измерения электропроводности цезиевой плазмы в экспериментах на ПУТ. Сравнение экспериментальных и расчетных величин показано на рис. 3. Приведены экспериментальные значения электропроводности

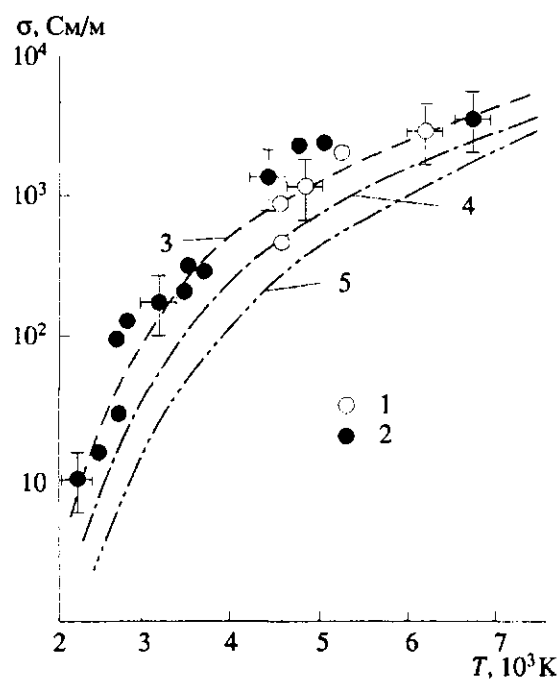

Рис. 3. *Результаты исследования электропроводности цезиевой плазмы на ПУТ: 1 – изобара 1 МПа [8]; 2 – данные предлагаемой работы; расчетные изобары; 3 – 0.1 МПа; 4 – 1 МПа; 5 – 5 МПа [9].*

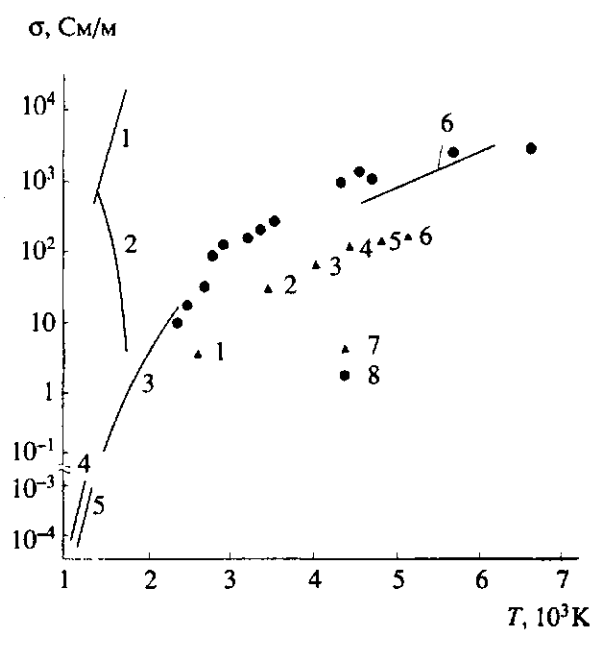

Рис. 4. *Электропроводность цезиевой плазмы. Насыщенный пар: 1 – [12]; 5 – [11]; изобары: 2 – P = = 2 МПа [13]; 3 – 0.1 МПа [10]; 4 – 0.1 МПа [11]; 6 – 1 МПа [8]; 7 – данные [2] (цифры около значков означают давление в МПа); 8 – данная работа.*

Таблица 1. Термодинамические параметры и электропроводность цезиевой плазмы

P, МПа	T, К	$n_e, 10^{23}$ м$^{-3}$	$n_a, 10^{25}$ м$^{-3}$	Γ	σ, См/м
0.7	6700	23.8	0.30	0.90	3200
0.86 5	5000	13.0	1.00	1.10	2000
0.88	4700	9.8	1.20	1.04	2000
0.91	4400	7.0	1.20	1.04	1300
0.61	3500	1.50	1.20	0.65	320
0.11	3200	0.27	0.24	0.33	180
0.067	2600	0.044	0.18	0.18	30
0.046	2500	0.022	0.13	0.13	17
0.055	2300	0.015	0.17	0.12	10

цезиевой плазмы, измеренные за фронтом отраженной ударной волны [8], и данные предлагаемой работы. Теоретические изобары P = 0.1, 1, 5 МПа рассчитаны по формуле Фроста [9].

В таблице представлены достигнутые на ПУТ термодинамические параметры и электропроводность цезиевой плазмы. Результаты исследований вместе с данными других работ приведены на рис. 4. В области низких температур наблюдается совпадение с результатами статических экспериментов [10], в области $T \geq 4.5 \times 10^3$ К с данными ударно-волновых экспериментов за отраженной ударной волной [8]. Отличие в промежуточной области параметров от результатов [2], возможно, объясняется высокими значениями давлений цезиевой плазмы в указанной работе.

Авторы выражают благодарность руководству МГП "Экофизика" за поддержку работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ивановский М.Н., Сорокин В.П., Субботин В.И.* Испарение и конденсация металлов. М.: Атомиздат, 1976.
2. *Боржиевский А.А., Сеченов В.А., Хорунженко В.И.* // ТВТ. 1989. Т. 27. № 3. С. 417.
3. *Боржиевский А.А., Сеченов В.А., Хорунженко В.И.* // ТВТ. 1989. Т. 27. № 4. С. 650.
4. *Побережский Л.П.* // ТВТ. 1968. Т. 6. № 6. С. 975.
5. *Бушман А.В., Ломакин Б.Н., Сеченов В.А. и др.* // ЖЭТФ. 1975. Т. 69. С. 1624.
6. *Сеченов В.А., Шекотов О.Е.* // ТВТ. 1972. Т. 10. № 6. С. 967.
7. *Коваленко И.С., Кучеренко В.И., Сеченов В.А.* // ЖПМТФ. 1985. № 2. С. 134.
8. *Сеченов В.А., Сон Э.Е., Шекотов О.Е.* // ТВТ. Т. 13. № 3. С. 652.
9. *Frost S.F.* // Appl. Phys. 1961. N. 11. P. 2029.
10. *Ермохин Н.В., Ковалев Б.М., Кулик П.П. и др.* // ТВТ. 1971. Т. 9. № 10. С. 665.
11. *Боржиевский А.А, Сеченов В.А., Хорунженко В.И.* // ТВТ. 1988. Т. 25. № 4. С. 722.
12. *Renkert H., Hensel F., Frank E.U.* // Ber. Bunsenges-Phys. Chem. 1971. B. 75.
13. *Alekseev V.A. et al.* // High Temp. - High Press. 1975. V. 7. P. 677.