ЛИТЕРАТУРА

1. *Tsintsadze N. L., Wilhelmsson H.* Instability in active molecular plasma. Phys. Scripta, 1975, v. 11, p. 316.
2. *Bonnedal M., Wilhelmsson H.* Nonlinear interaction of waves in an active molecular plasma. J. Plasma Phys., 1974, v. 4, p. 459.
3. *Ковтун В. П., Цинцадзе Н. Л.* К вопросу о неустойчивости электромагнитных волн в активной плазменной среде.– Сообщ. АН ГССР, 1977, т. 86, № 2, с. 321.
4. *Андреев Н. Е.* Возбуждение в плазме лэнгмюровских колебаний полем поперечной волны. ЖЭТФ, 1970, т. 59, вып. 6, с. 2105.
5. *Силин В. П.* Параметрическое воздействие излучения большой мощности на плазму. М.: Наука, 1973.
6. *Ковтун В. П.* Физика плазмы, 1981, № 4, с. 916.
7. *Ковтун В. П.* ЖТФ, 1981, т. 51, с. 940.

УДК 533.9.07

ДИАГНОСТИКА НЕИДЕАЛЬНОЙ (ПЛОТНОЙ) ПЛАЗМЫ В АДИАБАТИЧЕСКОЙ ТРУБЕ С ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ СТЕНКИ

Боржиевский А. А., Сеченов В. А., Хорунженко В. И.

Реализация ряда перспективных энергетических проектов связана с использованием рабочих веществ при температуре в десятки тысяч градусов и давлении в сотни атмосфер. Состояние вещества при этих параметрах принято называть неидеальной плазмой. В связи с отсутствием строгой теории, описывающей свойства такой плазмы, экспериментальные исследования ее характеристик имеют первостепенное значение. Однако количество и точность экспериментальных данных недостаточны для построения теории, корректно описывающей теплофизические свойства плазмы различных химических элементов в широком интервале давлений и температур.

К настоящему времени наиболее подробно изучены термодинамические свойства цезиевой плазмы. Исследования этих свойств проводились на стационарных [1, 2] и импульсных установках [3, 4]. И все же существует довольно обширная область параметров плазмы, соответствующая давлениям 100–500 атм и температурам $(3–7)\cdot10^3$ С, практически до сих пор экспериментально не исследованная. Плазму с такими параметрами можно получить на подогреваемой адиабатической трубе. Впервые экспериментальные исследования термодинамических свойств плотной цезиевой плазмы на подогреваемой адиабатической трубе проведены в [3]. Несовершенство диагностических методов не позволило авторам работы провести исследование цезиевой плазмы в широком диапазоне параметров. Значительно более высокие, чем в [3], параметры цезиевой плазмы получены на установке адиабатического сжатия [5], но в указанной работе не проводилось исследование термодинамических свойств цезиевой плазмы.

Авторами предлагаемой работы создана подогреваемая адиабатическая труба для исследования термодинамических свойств плотной плазмы в широком диапазоне параметров (рис. 1). Установка расположена вертикально. С помощью обогревателя ствол адиабатической трубы мог быть нагрет до 900° С. В рабочий объем ствола (между верхней частью поршня и измерительным узлом) напускается

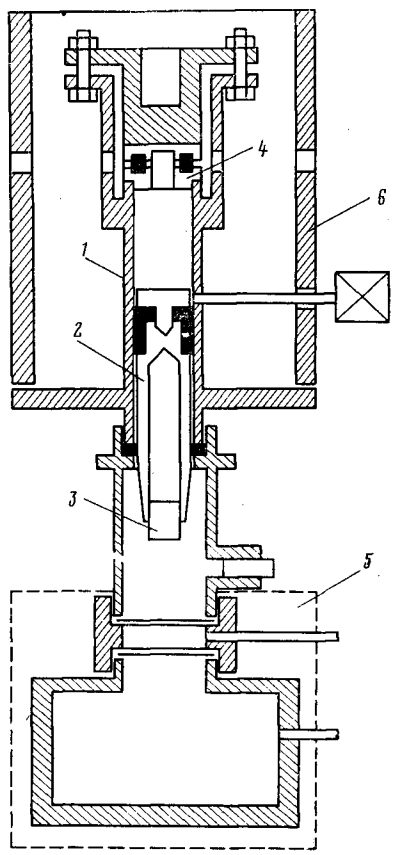

Рис. 1. Схема подогреваемой адиабатической трубы: *1* – ствол; *2* – поршень; *3* – датчик ускорения; *4* – измерительный узел; *5* – система высокого давления; *6* – обогреватель

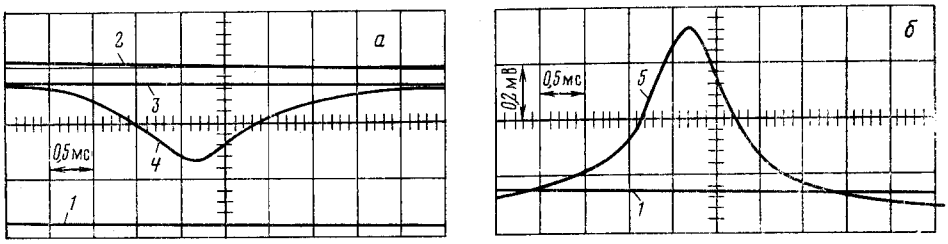

Рис. 2

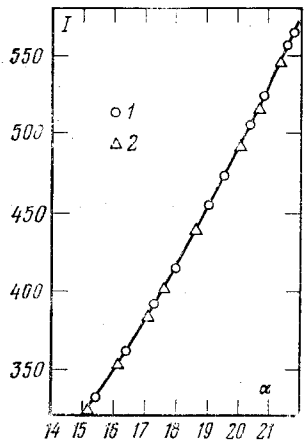

Рис. 3

Рис. 2. Осциллограммы изменения плотности (*а*) и давления (*б*) смеси цезия с аргоном в процессе изэнтропического сжатия газов (начальные параметры: температура подогрева адиабатической трубы ~800° С, парциальное давление аргона 2,5 атм, цезия 1,1 атм): *1* – нулевая линия; *2–4* – интенсивность регистрируемого рентгеновского сигнала перед и после напуска газов в трубу и в процессе их изэнтропического сжатия; *5* – сигнал с датчика ускорения

Рис. 3. Зависимость сигнала датчика ускорения *I* от степени сжатия α: *1* – прямой ход поршня, *2* – обратный

исследуемый газ. Под действием давления толкающего газа поршень приводится в движение и сжимает исследуемый газ; после достижения максимального сжатия поршень движется в обратном направлении, и исследуемый газ расширяется. В процессе проведения эксперимента измерялись начальное давление, температура и плотность исследуемого газа, плотность плазмы в процессе ее сжатия и ускорение поршня. Плотность плазмы определялась с помощью рентгеновской диагностики, ускорение поршня – с помощью пьезодатчика. По сигналу с пьезодатчика с помощью тарировочной зависимости определялось давление сжатой плазмы. С использованием указанных диагностических методов на подогреваемой трубе адиабатического сжатия можно исследовать термодинамические свойства плотной плазмы многих химических элементов и, в частности, свойства плотной плазмы щелочных металлов и их смесей с инертными газами.

При использовании рентгеновской диагностики излучение от рентгеновской трубки проходило через бериллиевое окно, расположенное в измерительном узле, и исследуемый газ в трубе, попадало на сцинтиллятор, установленный на катоде фотоумножителя ФЭУ-29. Сигнал с фотоумножителя через катодный повторитель регистрировался осциллографом С8-13. Методика проведения тарировки и импульсных рентгеновских измерений плотности плазмы на подогреваемой адиабатической трубе в основных чертах та же, что и при измерениях на подогреваемой ударной трубе [6]. Небольшое усовершенствование связано с высокой стабилизацией тока накала рентгеновской трубки и напряжения на аноде трубки при проведении импульсных измерений. Датчик размещался в хвостовой части поршня для исключения воздействия на него тепловых нагрузок и паров щелочного металла. Поршень с целью уменьшения теплового потока вдоль него выполнен из титана тонкостенным. В верхней части поршня установлена медная насадка. Чтобы в процессе изэнтропического сжатия газа предотвратить вытекание его из-под поршня, насадка притиралась к внутренней поверхности ствола с помощью алмазной пасты, при этом зазор между насадкой и стволом не превышал 5 мкм. В качестве пьезоэлемента датчика ускорения использован кристалл ниобата лития, который имеет линейную зависимость выходного сигнала в широком диапазоне нагрузок на него и температуру Кюри 1200° С. Тарировка датчика ускорения проводилась путем измерения зависимости выходного сигнала с датчика от нагрузки на пьезоэлемент. Кроме того, была построена тарировочная зависимость выходного сигнала с датчика ускорения от давления газа непосредственно при проведении экспериментов на подогреваемой адиабатической трубе. В последнем случае в качестве рабочего газа использовался аргон, который практически во всем исследованном диапазоне параметров описывается уравнением состояния идеального газа. В этих экспериментах регистрировались начальные параметры: давление и температура исследуемого газа, поглощение рентгеновского излучения в процессе сжатия газа и сигнал с датчика ускорения. С использованием начальных параметров, плот-

ности газа и уравнения адиабаты идеального газа рассчитывалось его давление в процессе изэнтропического сжатия. Тарировочные зависимости, полученные обоими методами, совпали, что свидетельствует о возможности более простой и точной тарировки датчика ускорения на специальном стенде. Тарировочная кривая аппроксимируется зависимостью $p=0{,}484\,I$, где p – давление сжимаемого газа в атм, I – сигнал с датчика ускорения в мВ. На рис. 2 представлены типичные осциллограммы изменения плотности и давления смеси цезия с аргоном в процессе сжатия и расширения плазмы. Запуск развертки осциллографов происходил в момент времени, приблизительно соответствующий максимальной скорости поршня. Об изэнтропичности процесса сжатия плазмы свидетельствует совпадение опытных данных при прямом и обратном ходе поршня (рис. 3).

В каждом эксперименте определялась энтропия газа (рассчитываемая по его начальным параметрам), давление и плотность плазмы в процессе изэнтропического сжатия. Варьируя начальные данные и давление толкающего газа, можно получить экспериментальные результаты в широком диапазоне параметров. Построенная по экспериментальным данным зависимость давления от энтропии и плотности плазмы позволяет рассчитывать температуру плазмы [3] и исследовать ее термодинамически полное уравнение состояния.

Московский физико-технический
институт

Поступило в редакцию
30.VIII.1982

ЛИТЕРАТУРА

1. *Stone J. P. et al.* J. Chem. Eng. Data, 1966, v. 11, N 3, p. 320.
2. *Алексеев В. А., Овчаренко В. Г., Рыжков Ю. Ф., Сенченков А. П.* Письма в ЖЭТФ, 1970, т. 12, № 6, с. 306.
3. *Кунавин А. Т., Кириллин А. В., Коршунов Ю. С.* ТВТ, 1974, т. 12, № 6, с. 1362.
4. *Бушман А. В., Ломакин Б. Н., Сеченов В. А. и др.* ЖЭТФ, 1975, т. 69, № 11, с. 1624.
5. *Исаков И. М., Ломакин Б. Н.* ТВТ, 1979, т. 17, № 2, с. 262.
6. *Сеченов В. А., Щекотов О. Е.* ТВТ, 1972, т. 10, № 5, с. 967.

УДК 533.9.5

О ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА РЕЗОНАНСНОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ДЛЯ ЛОКАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЫ МГД-ГЕНЕРАТОРА

Батенин В. М., Марголин Л. Я., Пятницкий Л. Н., Тимергалиев Р. Ш.

В данной работе рассмотрена возможность локальной диагностики плазмы МГД-генератора на основе резонансного рассеяния света – резонансной флуоресценции (РФ).

Метод РФ основан на селективном рассеянии света связанными электронами атомов или ионов, когда частота зондирующего излучения совпадает с собственной частотой соответствующего электронного перехода. Локальность измерений параметров плазмы достигается тем, что рассеянное излучение регистрируется из объема, расположенного на пересечении луча лазера и линии наблюдения. Величина исследуемого объема может быть доведена до 10^{-6} см^3 [1]. Другим достоинством метода РФ является высокая чувствительность, обусловленная большой величиной сечения рассеяния, которое может достигать 10^{-10}–10^{-8} см^2. Кроме того, использование метода РФ позволяет измерять большое число параметров плазмы. В частности, по энергетическим характеристикам РФ, их временному и спектральному изменениям можно определять концентрацию и температуру электронов и тяжелых частиц, направленные скорости последних.

В настоящее время имеется ряд работ с применением метода РФ, в которых объектом исследования являлась низкотемпературная плазма, моделирующая плазму рабочего тела МГД-генератора. Так, например, в [1–3] изучалась дуговая плазма сложного состава, резонансная флуоресценция на атомах щелочных металлов в плазме наблюдалась в работах [4, 5]; в [6] объектом исследования служила плазма продуктов сгорания.

Ниже приведены результаты расчетов и предварительных экспериментов, подтверждающие возможность применения метода РФ для диагностики плазмы МГД-генератора. Расчеты выполнены по методике [7] для параметров плазмы, характерных для МГД-генератора открытого цикла, когда в качестве легкоионизирующейся присадки используется калий. Приняты следующие значения параметров: давление $p=0{,}1$ МПа, температура $T_0=2500$ К, концентрация атомов калия $N_K=10^{16}$ см$^{-3}$, концентрация электронов $n_e=10^{14}$ см$^{-3}$ [8]. Эксперименты проведены на канале РМ МГД-генератора У-25 Института высоких температур АН СССР с близкими параметрами плазмы.