В опытах [12] с разрядами в потоке воздуха при $p \sim 10-10^2$ *мм рт. ст.* и при скоростях потока $10^4-3\cdot10^4$ *см/сек* показано, что применение турбулизующих устройств перед входом в зону разряда значительно повышает устойчивость разряда на входе. Возможно, что это объясняется увеличением скорости фронта ионизации за счет описанного механизма турбулентного переноса.

Вероятно, что различные турбулизующие устройства могут найти практическое применение в качестве специальных предионизаторов нейтрального потока газа, которые не нуждаются в отдельном источнике питания (энергия и плазма поставляются на вход из зоны основного разряда).

Авторы выражают благодарность Ю. П. Абрамову и А. А. Гладушу за полезные обсуждения.

Институт атомной энергии
им. И. В. Курчатова
Институт высоких температур
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
11 III 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. *E. P. Velikhov, A. M. Dykhne.* VIII Intern. Conf. Phenom. Gases, pap. 41, 4(1), Beograd, 1965.
2. *А. А. Иванов, В. В. Параил, Т. К. Соболев.* Ж. эксперим. и теор. физ., *64*, вып. 4, 1245, 1973.
3. *В. С. Голубев, М. М. Маликов.* Теплофизика высоких температур, *12*, № 5, 1974.
4. *В. Л. Грановский.* Электрический ток в газе. «Наука», 1971.
5. *R. H. Büllis, W. L. Nighan, M. C. Fowler, W. I. Weigand.* AIAA Paper № 71–64, 1971.
6. *W. L. Nighan.* XI Intern. Conf. Phenom. Ionized Gases, UAR-M107, Prague, 1973.
7. *R. Haas.* Phys. Rev., *8*, № 2, 1973.
8. *А. Н. Колмогоров, И. Г. Петровский, Н. С. Пискунов.* Бюлл. МГУ, сек. А, *1*, вып. 6, 1937.
9. *R. D. Hake, I. R. and A. V. Phelps.* Phys. Rev., *152*, № 1, 75, 1967.
10. *Дж. Хастед.* Физика атомных столкновений. «Мир», 1965, стр. 347.
11. *А. Б. Лойцянский.* Механика жидкости и газа. «Наука», 1960.
12. *A. H. Hill.* AIAA Paper № 71–65, 1971.

УДК 533.932

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ПЛАЗМЫ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ В ОТРАЖЕННОЙ ВОЛНЕ НА ПОДОГРЕВАЕМОЙ ЦЕЗИЕВОЙ УДАРНОЙ ТРУБЕ

В. А. Сеченов, О. Е. Щекотов

Данные по проводимости σ сильнонеидеальной плазмы совместно с термодинамическими параметрами: давлением p, удельным объемом U, удельной энтальпией H, температурой T, измеряемыми и вычисляемыми в ударно-волновых экспериментах по методике, предложенной в [1, 2], позволяют провести достаточно полный анализ свойств плазмы в малоизученной области $\gamma = e^2 n_e^{1/3}/kT \sim 1$.

В данной работе предлагается методика измерения проводимости цезиевой сильнонеидеальной плазмы индукционным методом по схеме параллельного колебательного контура [3] применительно к подогреваемой цезиевой ударной трубе [4]. Специфика использования индукционного метода измерения проводимости на подогреваемой цезиевой ударной трубе состоит в наличии агрессивной среды (пары цезия) и высокой температуры ~600° С датчика, представляющего собой катушку индуктивности. Защита датчика от паров цезия достигается следующим образом.

Датчик выполняется в виде плоской спиральной катушки и крепится на поверхности керамического диска, химически устойчивого к парам цезия. Диск впаивается по образующей в корпус из ковара, который пристыковывается к торцу рабочего канала ударной трубы.

Другая особенность работы датчика – изменение эквивалентных параметров катушки индуктивности $R_э$ и $L_э$ при выходе датчика на рабочий температурный режим. Охлаждение датчика в данном случае неприменимо, так как давление насыщенных паров цезия определяется самой холодной точкой рабочего канала. Поэтому калибровка датчика проводится при температуре, соответствующей температуре рабочих

измерений. Датчик калибруется эталонными образцами проводимости. В качестве эталонов использовался графит в диапазоне проводимостей (1÷100) *мо/см*, перекрывающем диапазон измеряемых проводимостей. Диаметр графитов равнялся диаметру рабочего канала. Калибровка проводилась с сохранением геометрии эксперимента.

Изготовление однородных графитовых образцов в данной области проводимостей – сложная технологическая задача, достигается она варьированием состава исходных компонентов, давления прессования и температуры обжига.

На рис. 1 приведены калибровочные кривые датчика, проведенные при комнатной и рабочей температурах. По оси ординат отложено относительное изменение сигнала с датчика $\Delta J/J_0 = J_0 - J_\sigma/J_0$, где J_0 и J_σ – амплитуды сигналов без образца и при внесении образца проводимости σ. С увеличением температуры чувствительность датчика падает при неизменной резонансной частоте f_0. Падение чувствительности связано с возрастанием R_0 катушки индуктивности из-за температурного роста удельного сопротивления, а также уменьшения межвиткового сопротивления.

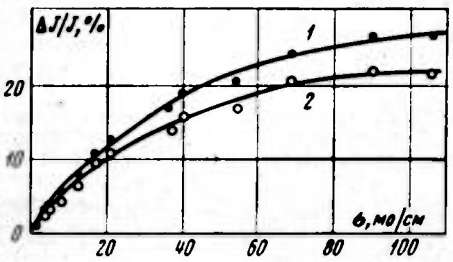

Рис. 1. Калибровочные зависимости изменения сигнала с датчика от проводимости эталонного образца:

1 — $t = 20°$ С, $f_0 = 910$ *кгц*; *2* — 600° С, 905 *кгц*

На рис. 2 приведены осциллограммы сигналов, соответствующих измерениям проводимости и плотности за отраженной ударной волной в парах цезия. Верхний луч передает изменение амплитуды напряжения на датчике, нижний – поглощение рентгеновского излучения на расстоянии 1 *см* от торца датчика.

Начальные параметры паров цезия: $T_0 = 873°$ К, $P_0 = 0{,}4$ *атм*. Параметры отраженной ударной волны: $P_5 = 110$ *атм*, $U_5 = 66$ *см*^{2}/*г*, $T_5 = 9000°$ К, $\gamma_5 = 0{,}7$, $\sigma = 45$ *мо/см*. T_5 и γ_5 рассчитывались по дебаевской теории в большом каноническом ансамбле [5], U_5 получено из рентгенограмм поглощения [2]. Ошибка в определении проводимости индукционным методом определяется следующими факторами: конечным размером отраженной волны; охлаждением ударной волны за счет лучистой и электронной теплопроводности; ошибкой градуировки. Характерный размер отраженной ударной волны ~10 *мм*, толщина скин-слоя при частоте $\nu = 1$ *Мгц* для проводимостей 10–100 *мо/см* составляет 5–15 *мм* и для малых проводимостей может быть больше характерного размера. Однако простран-

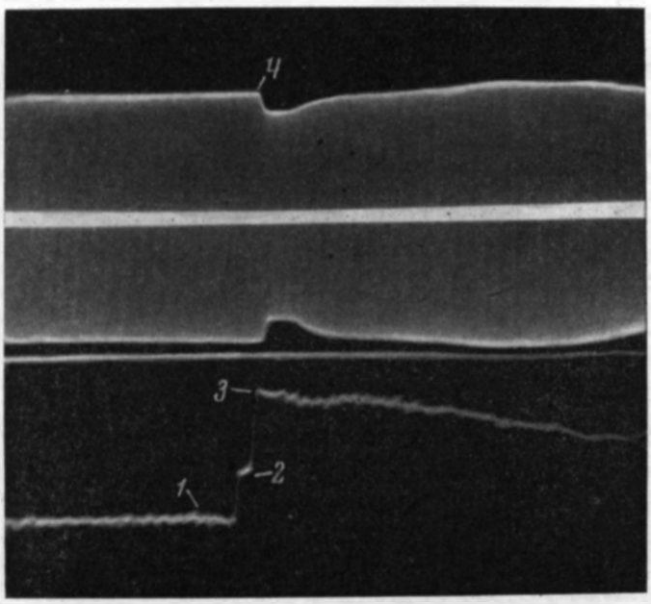

Рис. 2. Осциллограммы сигналов:

1 — рентгеновский сигнал до прихода ударной волны; *2* — скачок плотности за фронтом падающей ударной волны; *3* — скачок плотности за фронтом отраженной ударной волны; *4* — сигнал с датчика проводимости $f_0 = 905$ *кгц*

ственное разрешение применяемого датчика ~5 *мм*, поэтому погрешность не вносится даже при толщине скин-слоя, большей размера пробки отраженной волны. Охлаждение отраженной волны оценивалось для $P=50\div150$ *атм* и $T=(10-20)\cdot10^3$ °K. Полученные оценки показывают, что за время установления сигнала с датчика (5–10 *мк сек*) толщина зоны, охлажденной до температуры, меньшей 0,8 T, не превосходит 0,1 *мм*, что не вносит в измерения дополнительной погрешности. Погрешность градуировки датчика определялась экспериментально и составила 15%.

Результаты измерений в широкой области температур и давлений, а также сравнение полученных результатов с расчетами и результатами других авторов будут опубликованы позднее.

Московский физико-технический институт

Поступило в редакцию
23 IX 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ю. Г. Красников, В. Е. Фортов.* Ж. эксперим. и теор. физ., *59*, № 5, 1970.
2. *В. А. Сеченов, О. Е. Щекотов.* Теплофизика высоких температур, *10*, № 5, 1972.
3. *Р. В. Васильева, К. В. Донской, В. М. Добрынин, В. Х. Манеров, Г. К. Тумаков, В. А. Шингаркина.* Ж. техн. физ., *40*, № 3, 1970.
4. *Ю. Г. Красников, Б. Н. Ломакин.* Вопросы физики низкотемпературной плазмы. «Наука и техника», Минск, 1970.
5. *Б. Н. Ломакин, В. Е. Фортов, О. Е. Щекотов.* Теплофизика высоких температур, *8*, № 1, 1970.

УДК 537.525.1

ПЕРЕХОД ГАЗОВОГО РАЗРЯДА В КОНТРАГИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ

Е. А. Муратов, Н. Г. Персианцев, В. Д. Письменный, А. Т. Рахимов

Известно, что диффузные газовые разряды в цилиндрических трубках при увеличении тока контрагируются. Хотя степень сжатия разрядного тока зависит от многих конкретных характеристик газоразрядной плазмы (степень ионизации газа, механизм рекомбинации заряженных частиц, наличие электроотрицательных примесей и т. д.), наиболее общим механизмом контрагирования тока в длинных цилиндрических трубках является радиальное вытеснение нагревающегося газа из приосевой области к периферии разрядной трубки [1—3]. Это вытеснение — следствие градиента температуры по радиусу трубки, обусловленного в свою очередь поверхностным теплоотводом выделяющейся в разряде энергии.

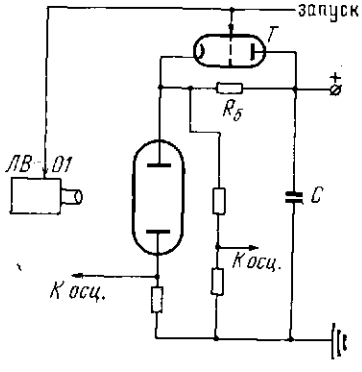

Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Для выяснения вопроса, насколько существен разогрев газа при переходе объемного разряда в контрагированное состояние, проводились эксперименты по исследованию этого переходного процесса. В стеклянной трубке, наполненной газом, зажигался нормальный тлеющий разряд, причем давление газа, разрядный ток и напряжение выбирались такими, чтобы разряд заполнял все сечение разрядной трубки. Как известно, устойчивое горение разряда осуществляется при включении в разрядную цепь балластного сопротивления, величина которого определяется разрядным током, и, как правило, много больше сопротивления плазмы. В этом случае любая флуктуация тока в плазме сопровождается стабилизирующим разряд перераспределением падения напряжения между балластным сопротивлением и разрядной трубкой [4].

Если же в некоторый момент времени на разрядной цепи исключить балластное сопротивление, то в плазме будут созданы условия для свободного развития неустойчивости [5], приводящей к переходу объемного разряда в состояние контрагированной дуги, что можно обнаружить, регистрируя временной ход тока и радиальное распределение свечения в разрядной трубке.

Схематически экспериментальная установка показана на рис. 1. Газоразрядная трубка — это стеклянный цилиндр диаметром 8 *см* с впаянными электродами. Диаметр электродов и межэлектродный зазор составляли соответственно 5 и 10 *см*. Предварительно откачанная трубка наполнялась газом (Не или CO_2) до давления 4—40 *мм*