

## О СОСТОЯНИИ ПЛАЗМЫ КОМПРЕССИОННОГО ПОТОКА В МАГНИТОПЛАЗМЕННОМ КОМПРЕССОРЕ КОМПАКТНОЙ ГЕОМЕТРИИ

В.М. АСТАШИНСКИЙ<sup>1</sup>, Л.Я. МИНЬКО<sup>1</sup>,  
М.М. КУРАЙЦА<sup>2</sup>, М. ЧУК<sup>3</sup>, Я. ПУРИЧ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт молекулярной и атомной физики  
Национальной академии наук Беларуси  
Пр. Ф.Скарыны, 70, 220072 Минск, Беларусь  
E-mail: lrp@imaph.bas-net.by*

<sup>2</sup> *Физический факультет Университета в Белграде  
п.п.368, 11001 Белград, Югославия  
E-mail: kuki@rudjer.ff.bg.ac.yu*

<sup>3</sup> *Центр науки и технологического развития,  
Обилићев венац 26, 11001 Белград, Югославия*

**РЕЗЮМЕ.** Проведен анализ термодинамических параметров плазмы компрессионного потока, генерируемого магнитоплазменным компрессором (МПК) компактной геометрии. Показано, что на квазистационарной стадии развития разряда в МПК, плазмообразующим веществом которого является водород, устанавливается локальное термодинамическое равновесие плазмы компрессионного потока.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время достаточно большое внимание уделяется исследованиям компактных ускорителей, способных работать в составе сложных плазмодинамических систем. Одной из таких плазмодинамических систем нового поколения является двухступенчатый квазистационарный сильноточный плазменный ускоритель (КСПУ) типа П-50М (Морозов, 1991; Асташинский, 1992).

К плазменным потокам, генерируемым первой ступенью КСПУ — входным ионизационным блоком (ВИБ), состоящим из набора входных ионизационных камер (ВИК) — предъявляют довольно противоречивые требования. С одной стороны, они должны обеспечить достаточно равномерное заполнение плазмой входного сечения основного ускорительного канала КСПУ (т.е. плазменный поток ВИБ должен иметь довольно сильную расходимость), с другой — плазменный поток должен без ощутимых потерь пройти дрейфовый канал ускорителя (т.е. расходимость

плазменного потока должна быть невелика). В ИМАФ НАН Беларуси и в Центре научно-технического развития Белградского университета созданы и исследуются магнитоплазменные компрессоры компактной геометрии (МПК-КГ), способные работать в составе КСПУ в качестве его входных ионизационных камер.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика формирования компрессионных потоков в МПК-КГ и результаты определения основных параметров плазмы таких потоков достаточно подробно изложены в (Асташинский и др., 1991, Асташинский и др., 1992). При работе МПК-КГ с импульсной (клапанной) подачей водорода формирующийся компрессионный поток длиной 4-5 см и диаметром  $\sim 1$  см имеет следующие параметры: скорость плазмы —  $(4 \div 7) \cdot 10^6$  см/с; концентрация  $N_e$  и температура  $T_e$  электронов плазмы составляют соответственно  $(2 \div 4) \cdot 10^{17}$  см $^{-3}$  и 1-2 эВ.

Измеренные значения температуры и концентрации электронов позволяют сделать вывод о том, что состояние плазмы компрессионного потока описывается моделью локального термодинамического равновесия (ЛТР). Действительно, необходимым условием существования ЛТР в оптически тонкой стационарной и однородной плазме является  $N_e \geq N_{кр}$ , где  $N_{кр}$  для водорода при  $T_e \sim 1$  эВ составляет  $\sim 10^{17}$  см $^{-3}$  (Грим, 1969). Отметим здесь, что условие частичного ЛТР для уровней  $n \geq 3$  менее жесткое:  $N_e \geq 10^{15}$  см $^{-3}$  (Визе, 1967).

Неоднородность плазменных образований накладывает следующие ограничения на параметры, описывающие локальное состояние плазмы (Рихтер, 1971):

$$\lambda_{e,i} grad W < W \quad (1)$$

где  $\lambda_{e,i}$  — средняя длина свободного пробега электрона в плазме;  $W$  — рассматриваемый параметр.

Выражение для  $\lambda_{e,i}$  запишем следующим образом (Рихтер, 1971):

$$\lambda_{e,i} = 4,5 \cdot 10^5 \frac{T_e^2}{N_e \Lambda}$$

где  $T_e$  — температура,  $N_e$  — концентрация электронов,  $\Lambda = \ln 1,2 \cdot 10^4 (T_e^3/N_e)^{1/2}$  — кулоновский логарифм.

При реализуемых в компрессионном потоке параметрах плазмы средняя длина свободного пробега электронов составляет  $\sim 2 \cdot 10^{-6}$  см, что, с учетом наблюдаемых в эксперименте градиентов  $N_e$  и  $T_e$ , приводит к выполнению неравенства (1) с большим запасом.

Для существования ЛТР в условиях нестационарной плазмы необходимо, чтобы время установления кинетического равновесия между электронами и тяжелыми частицами было мало по сравнению с характерным (пролетным) временем плазменного потока. Время установления кинетического равновесия между электронами и тяжелыми частицами определим согласно выражению (Зельдович и др., 1966):

$$\tau_{e,i} = 250 \frac{T_e^{3/2}}{N_e \Lambda}$$

Для указанных выше значений параметров плазмы  $\tau_{e,i}$  составляет  $\sim 5 \cdot 10^{-10}$  с, что значительно меньше характерного (пролетного) времени плазменного потока ( $\sim 1$  мкс).

Существование ЛТР в плазменном потоке позволяет определить степень ионизации плазмы, исходя из уравнения Саха с учетом схемы упрощений Рессела-Саундерса (Франк-Каменецкий, 1968):

$$\frac{N_e N_i}{N_a} \approx \frac{2 g_i}{g_0 + g_i} \cdot \frac{e^{-\epsilon_i/T}}{T^{3/2}} \cdot e^{-\frac{J^*}{T}} \quad (2)$$

где  $J^* = J - \Delta J$ ,  $\Delta J = 1,93 \cdot 10^{10} (N_e T_e)^{1/2}$ , — снижение потенциала ионизации в эВ;  $N_e$ ,  $N_i$ ,  $N_a$  — концентрация электронов, ионов и атомов;  $T$  — температура плазмы в эВ;  $\epsilon_i$  — энергия первого возбужденного состояния атома в эВ;  $J$  — потенциал ионизации в эВ;  $g_i$  — статистический вес основного состояния иона;  $g_0$  и  $g_i$  — статистические веса основного и первого возбужденного состояний атома (для водорода  $g_0 = 2$ ;  $g_i = 1$  и  $g_i = 6$ ).

Используя полученные в эксперименте значения  $T_e$  и  $N_e = N_i$ , можно из выражения (2) рассчитать константу равновесия  $k \equiv N_e \cdot N_i / N_a$ , а затем и концентрацию атомов  $N_a = N_e \cdot N_i / k$ , что позволит определить степень ионизации плазмы:  $\alpha = N_i / (N_a + N_i)$ .

Например, при увеличении  $T_e$  от 1 эВ до 1,5 эВ с соответствующим изменением  $N_e$  от  $1,5 \cdot 10^{17}$  до  $3,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , степень ионизации  $\alpha$  увеличивается с 5 до 93 %.

Таким образом, проведенный анализ параметров плазмы в МПК компактной геометрии, показывает, что состояние плазмы компрессионного потока на квазистационарной стадии развития разряда описывается моделью локального термодинамического равновесия.

## Литература

- Морозов А.И.: 1990, *Физика плазмы*, **16**, 131.
- Асташинский В.М., Маньковский А.А., Минько Л.Я., Морозов А.И.: 1992, *Физика плазмы*, **18**, 90.
- Асташинский В.М., Ефремов В.В., Костюкевич Е.А. и др.: 1991, *Физика плазмы*, **17**, 1111.
- Асташинский В.М., Баканович Г.И., Кузьмицкий А.М. и др.: *Инженерно-физический журнал*, **62**, 386.
- Грим Г.: 1969, *Спектроскопия плазмы*, Атомиздат, Москва.
- Визе В.: 1967, *Диагностика плазмы*, Мир, Москва, 218.
- Рихтер Ю.: 1971, *Методы исследования плазмы*, Мир, Москва, 9.
- Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.: 1966, *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений*, Наука, Москва.
- Франк-Каменецкий Д.А.: 1968, *Лекции по физике плазмы*, Атомиздат, Москва.