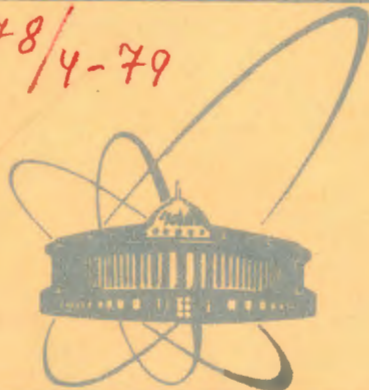


5178/4-79



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

K-95

P9 - 12578

В.Б.Кутнер, В.И.Кочкин, А.С.Пасюк, Ю.П.Третьяков

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ  
И ПОТЕРЬ ИОНОВ He И N  
В ЦИКЛОТРОННОМ ИСТОЧНИКЕ  
МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

P9 - 12578

В.Б.Кутнер, В.И.Кочкин, А.С.Пасюк, Ю.П.Третьяков

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ  
И ПОТЕРЬ ИОНОВ  $He$  И  $N$   
В ЦИКЛОТРОННОМ ИСТОЧНИКЕ  
МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

*Направлено в ЖТФ*

Моделирование процессов образования и потерь ионов He и N в циклотронном источнике многозарядных ионов

С учетом реальных процессов, происходящих в циклотронном источнике многозарядных ионов, обобщены ранее известные подходы для оценок выхода многозарядных ионов из различных типов ионных источников. Для разрядов на He и N на ЭВМ БЭСМ-6 проведено численное интегрирование по методу Рунге-Кутты автономной системы линейных обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка. Количественное согласие результатов расчета для He с экспериментом получено при следующих параметрах модели:  $T_e = 15$  эВ,  $\tau = 10^{-5}$  с,  $a_1 = 10^{-11}$  см<sup>3</sup>с<sup>-1</sup> и  $a_2 = 4 \cdot 10^{-11}$  см<sup>3</sup>с<sup>-1</sup>. Согласие расчетных данных для N с экспериментальными результатами достигнуто при:  $T_e = 30$  эВ,  $\tau = 2,5 \cdot 10^{-6}$  с,  $a_z = Z^2 \cdot 10^{-11}$  см<sup>3</sup>с<sup>-1</sup>.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Modelling of Generation and Losses of He and N Ions in the Cyclotron Multicharged Ion Source

The previous approximations for the evaluation of yields of the multicharged ions from ion sources of various types have been generalized with considering real processes taking place in a cyclotron ion source. The calculations for discharges on He and N have been made by means of FORTRAN program. The results of calculations quantitatively correspond to experimental data.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

Развитие газоразрядного источника многозарядных ионов с целью получения более интенсивных пучков и высокозарядных состояний требует понимания основных процессов, происходящих в нем, а также их количественного описания.

Впервые образование многозарядных ионов N в импульсном разряде с использованием модели ступенчатой ионизации рассмотрел О.Б.Фирсов<sup>1/</sup>. Им было получено качественное сходство результатов численного расчета с экспериментальными данными.

В дальнейшем моделированию процессов получения и потерь многозарядных ионов было посвящено несколько работ. В работе<sup>2/</sup> сформулирована модель, в которой ионизация осуществлялась потоком первичных электронов, но вместе с тем предлагалось учитывать рекомбинационные потери и процесс ион-атомной и ион-ионной перезарядки.

Система стационарных уравнений с учетом одно- и многократной ионизации и рекомбинации ионов на стенках источника решена в работе<sup>3/</sup>.

Расчет накопления ионов в электронном кольце в результате ступенчатой ионизации из непрерывной и импульсной струи атомов газа проведен в работе<sup>4/</sup>.

В работах<sup>5,6/</sup> при расчетах учтен вклад Оже-ионизации и, кроме рекомбинации на стенках газоразрядной камеры, введена объемная рекомбинация.

Расчеты, проведенные Дарлингом и Дэвисом<sup>6/</sup>, показали, что изменение одних параметров модели может быть компенсировано вариацией других. Это значит, что для разработки модели требуется необходимая определенность в параметрах плазмы газового разряда, таких как  $T_e$  - температура электронов,  $T_i$  - температура ионов,  $n_e(E)$  - энергетическое распределение электронов,  $\tau_z$  - время ухода ионов из разряда и др.

В настоящей работе моделируются процессы образования и потерь ионов в циклотронном источнике с учетом ранее известных подходов. Расчеты выполнены для He и N т.к. разряды на этих газах наиболее изучены<sup>1,7,11</sup> и имеется большое количество экспериментальных данных, которые могут быть использованы в модели.

### ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Феноменологическая модель процессов, происходящих в циклотронном источнике многозарядных ионов, может быть описана автономной системой дифференциальных уравнений первого порядка. Для азотной плазмы система уравнений представляется следующим образом:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dn_0}{dt} &= F_0 + \sum_{z=1}^7 \frac{n_z}{\tau_z} - a_0 n_0 n - n_0 \sigma_0 j + a_1 n_1 n, \\ \frac{dn_z}{dt} &= \frac{n_z}{\tau_z} + a_{z-1} n_{z-1} n - a_z n_z n + n_{z-1} \sigma_{z-1} j - n_z \sigma_z j - a_z n_z n + a_{z+1} n_{z+1} n, \\ & z = 1 \div 6, \\ \frac{dn_7}{dt} &= \frac{n_7}{\tau_7} + a_6 n_6 n + n_6 \sigma_6 j - a_7 n_7 n, \\ n &= \sum_{z=1}^7 z n_z. \end{aligned} \right.$$

где:  $F_0$  - поток атомов рабочего газа;  $n_z(t)$  - концентрация ионов  $z$ -й зарядности;  $n(t)$  - концентрация электронов плазмы;  $\tau_z$  - время дрейфа ионов  $z$ -й зарядности на стенки разрядной камеры;  $a_z$  - коэффициенты ударной ионизации электронами;  $j$  - поток первичных электронов;  $a_z$  - коэффициент рекомбинации  $z$ -зарядного иона.

Выбранная модель исходит из условия квазинейтральности плазмы. Ионы образуются последовательной ионизацией. Для расчета коэффициентов ударной ионизации  $a_z = \sigma_z(E) \cdot v_e$ , где  $v_e$  - скорость электрона, использовалась зависимость Бете

$$\sigma_z(E) = \frac{\epsilon_1 K}{E} \ln \frac{E}{E_z}, \quad \text{Эквивалентные электроны } \epsilon_1 \text{ оболочки}$$

учитывались аналогично тому, как это сделано в работе<sup>13</sup>. Из этой же работы взят коэффициент  $K = 4,5 \cdot 10^{-14} \text{ эВ}^2 \text{ см}^2$ .

Функция распределения электронов по энергиям состоит из двух частей: максвелловских тепловых электронов с температурой  $T_e$  и быстрых первичных электронов с катода со скоростью, соответствующей напряжению дуги.

Оже-каскад, который играет важную роль в образовании высокозарядных ионов<sup>3,6,12</sup>, в расчетах для He и N для простоты модели не учитывался.

Потери ионов учитываются в виде рекомбинации на стенках газоразрядной камеры и объемной ионно-электронной рекомбинации с захватом ионом лишь одного электрона.

В расчетах времена дрейфа ионов различных зарядов поперек магнитного поля принимаются равными. Коэффициент объемной рекомбинации ионов с зарядом  $Z$  вводится в виде  $a_z = Z^2 a_1$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА, ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

#### Гелий

Для He большинство параметров, используемых в модели, известны. Поэтому расчет характеристик разряда на He является в определенном смысле тестом для выбранного приближения в данной физической модели основных физических процессов, происходящих в источнике, и программы расчета.

В работах<sup>3,10</sup> спектроскопическим методом измерены следующие характеристики плазмы разряда циклотронного источника многозарядных ионов ЛЯР ОИЯИ:

$$T_e = 9 \div 13 \text{ эВ}, \quad n_e = 9 \cdot 10^{13} \div 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}, \quad n_0 = 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$$

Результаты расчета для разряда на He в сравнении с экспериментальными данными<sup>1,10</sup> представлены на рис. 1.

Количественное согласие результатов расчета с экспериментом получено при  $T_e = 15 \text{ эВ}$ ,  $\tau = 10^{-5} \text{ с}$ ,  $a_1 = 10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}$ ,

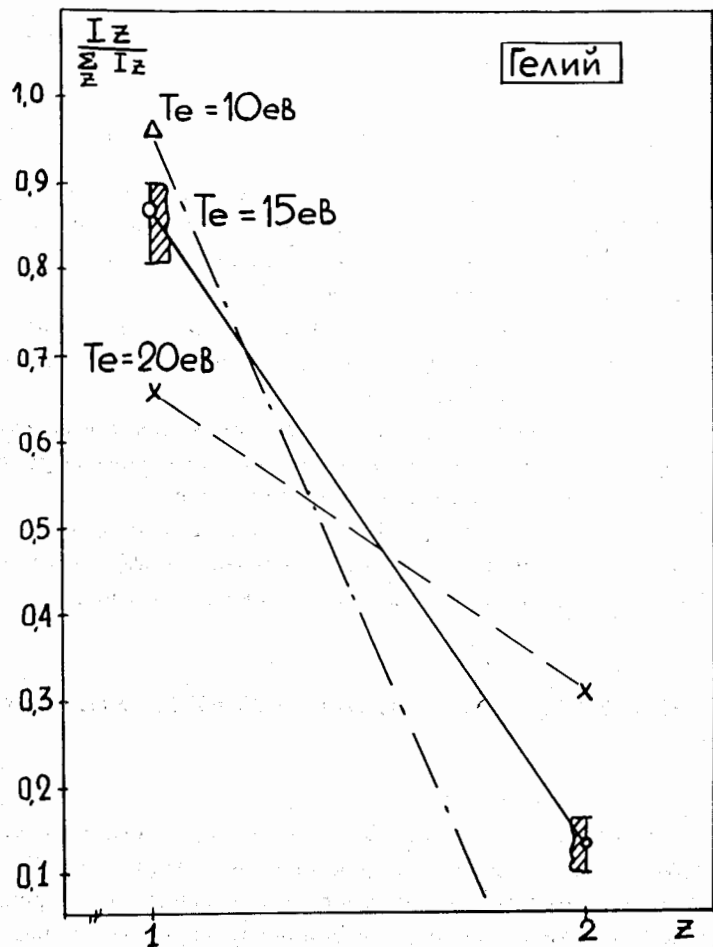


Рис.1. Сравнение расчетных данных с выходом ионов He из источника. Заштрихованной зоной обозначен экспериментальный диапазон.

$\alpha_2 = 4 \cdot 10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}$ . При этом к концу импульса разряда длительностью 1 мс концентрация электронов достигает  $8,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , а нейтралей  $n_0 = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Абсолютные концентрации ионов  $\text{He}^+$  и  $\text{He}^{2+}$  также являются реальными.

Азот

Из-за отсутствия многих экспериментальных параметров моделирование процессов проводилось путем подбора этих величин из ранее известного диапазона. Для электронной температуры этот интервал достаточно широк:  $T_e = 20 \div 700 \text{ эВ}$ . В оценках О.Б.Фирсова<sup>1/</sup> качественное согласие с эксперименталь-

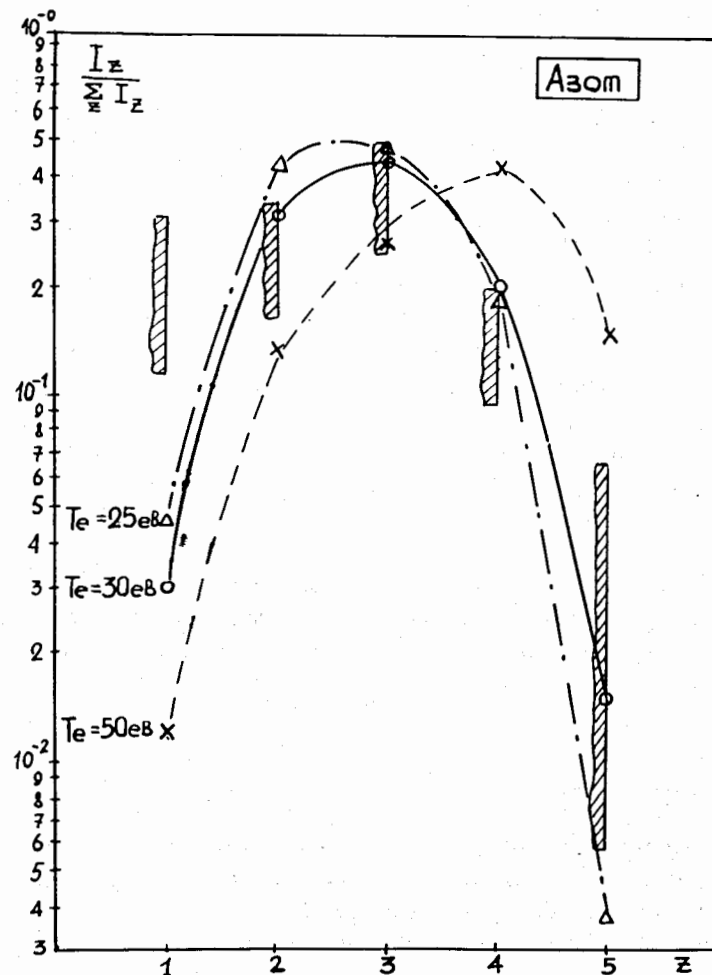


Рис.2. Сравнение результатов расчета с выходом ионов N из источника. Заштрихованная область соответствует экспериментальным данным.

ными данными достигается при  $T_e = 20$  эВ. В работе Б.Н.Макова<sup>/11/</sup> из измерений магнитогидродинамического давления в плазме разрядного шнура приводится значение электронной температуры  $T_e = 150$  эВ. Количественное согласие расчетов<sup>/3/</sup> с экспериментом для разряда на ксеноне получено при  $T_e = 700$  эВ.

В качестве исходных данных для величины времени дрейфа на стенку газоразрядной камеры взяты результаты экспериментов<sup>/1/</sup>, где было установлено, что за время  $\sim 10$  мкс концентрации ионов до  $N^{5+}$  достигают максимальной величины и исчезают за несколько микросекунд после гашения разряда.

На рис. 2 представлено сравнение настоящих расчетов с экспериментальными данными различных авторов<sup>/7, 11, 14/</sup>. Наилучшее согласие расчетных данных с экспериментальными получено при следующих параметрах:  $T_e = 30$  эВ,  $\tau = 2,5 \cdot 10^{-6}$  с,  $\alpha_z = Z^2 \cdot 10^{-11}$  см<sup>3</sup>/с.

По-видимому, величина электронной температуры, полученная в этих расчетах, несколько ниже реальной, т.к. в модели не был учтен процесс перезарядки, который в данном источнике ионов с большими концентрациями частиц должен приводить к потерям высокозарядных состояний. Кроме того, в модели рассматривался единичный объем плазмы в средней части разряда и не учитывался дрейф частиц вдоль магнитного поля, который в прикатодных областях является существенным.

В заключение авторы благодарят О.Б.Фирсова за консультации, Б.Н.Макова за замечания, В.И.Илющенко за советы и обсуждения в ходе расчетов, Е.П.Жидкова и Г.А.Осооскова - за поддержку данной работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пигаров Ю.Д., Морозов П.М. ЖТФ, 1961, т. 31, в. 4, с. 476.
2. Tauth T., Bajard M., Hadinger G. Lycen-7112, Institut de Physique Nucleaire de Lyon. 1971.
3. Fuchs G. IEEE Trans. on Nucl.Sci., 1972, v. NS-19, no.2, p. 160.
4. George B. и др. ОИЯИ, P9-6555, Дубна, 1972.
5. Darling R.L., McShan D.L., Davis R.H. Rev.Sci.Instr., 1972, v.43, No.3, p.481.
6. Darling R.L., Davis R.H. Rev.Sci.Instr., 1973, v. 44, p. 375.

7. Пигаров Ю.Д., Морозов П.М. ЖТФ, 1961, т. 31, в. 4, с. 467.
8. Романов Н.П., Пасюк А.С. Оптика и спектроскопия. 1968, т. 24, № 3, с. 337.
9. Романов Н.П. Оптика и спектроскопия. 1968, т. 24, № 6, с.873.
10. Романов Н.П. Оптика и спектроскопия. 1969, т. 26, № 5, с. 683.
11. Makov B.N. IEEE Trans. on Nucl.Science 1976, v. NS-23, No. 2, p. 1035.
12. Septier A. IEEE Trans. on Nucl.Science 1972, v. NS-19, No. 2, p. 22.
13. Илющенко В.И., Кочкин В.И. ОИЯИ, 7-7226, Дубна, 1973.
14. Пасюк А.С., Го Ци-цзянь, Третьяков Ю.П. ОИЯИ, 1523, Дубна, 1964.

Рукопись поступила в издательский отдел  
25 июня 1979 года.