

УДК 533.9

## Измерения эффективного заряда плазмы по спектру мягкого рентгеновского излучения и по проводимости на стеллараторе Л-2М в условиях боронизации вакуумной камеры

А. И. Мещеряков, И. Ю. Вафин

*В работе измерение сопротивления плазменного шнура было использовано для определения эффективного заряда плазмы в двух режимах омического разряда стелларатора Л-2М: до и после проведения процедуры боронизации вакуумной камеры. В режимах без боронизации вакуумной камеры  $Z_{eff}$  принимает значения от 4 до 6 и уменьшается с ростом плотности. С введением процедуры боронизации значения эффективного заряда, измеренные по проводимости, лежат в интервале  $Z_{eff} = (1,5—2)$  и не проявляют зависимости от плотности. Сравнение значений эффективного заряда, вычисленных по спектру мягкого рентгеновского излучения и по электропроводности, показывает, что в случае, когда фактор превышения меньше 20, оба метода хорошо согласуются. В импульсах, когда фактор превышения больше значения 20, допущение о доминировании одной примеси, а именно, бора, не верно, и вышеизложенный метод требует более сложного анализа.*

PACS: 52.50.-b

*Ключевые слова:* стелларатор, плазма, эффективный заряд, измерение, вакуумная камера.

### Введение

Одним из параметров, указывающим на успешное удержание плазмы в тороидальных магнитных системах, является эффективный заряд плазмы  $Z_{eff}$ :

$$Z_{eff} = \frac{\sum_i n_i Z_i^2}{\sum_i n_i Z_i} \quad (1)$$

где  $n_i$  — концентрация определенных ионов в плазменном шнуре,  $Z_i$  — заряд соответствующего иона. Суммирование следует проводить по всем зарядовым состояниям всех присутствующих в плазме примесей, так что  $\sum_i n_i Z_i = n_e$ , где  $n_e$  —

концентрация электронов в плазме.

На стеллараторе Л-2М уже проводились измерения эффективного заряда плазмы [1]. Однако с внедрением процедуры боронизации рабочей камеры из оптических измерений было установлено, что существенно изменился состав примесей [2].

Это должно было привести и к изменению значения эффективного заряда плазмы. Таким образом, возникла необходимость в измерении значения эффективного заряда плазмы в новых условиях. Это и являлось главной целью данной работы.

Стелларатор Л-2М — классический двухзаконный стелларатор ( $l = 2$ ). Параметры разряда и плазмы менялись в следующих пределах: напряжение на обходе на стационарной стадии разряда  $U_L$  от 2,1 до 2,8 В, плазменный ток  $I_P$  от 17 до 19 кА, электронная температура в центре плазменного столба  $T_e$  — от 250 до 350 эВ, средняя по центральной хорде плотность плазмы  $n_e = (0,5—1,7) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ .

Измерения проводились на квазистационарной стадии разряда по проводимости плазменного шнура и по спектральным измерениям.

### Вычисление эффективного заряда плазмы из измерения сопротивления плазменного шнура

В режиме с нагревом индукционным током измерение эффективного заряда плазмы базируется на вычислении сопротивления плазменного шнура и на его сравнении с сопротивлением, измеренным в режиме омического нагрева:

$$R_{exp} = \frac{U_L}{I_P},$$

где  $U_L$  — напряжение на обходе,  $I_P$  — плазменный ток (рис. 1).

Мещеряков Алексей Иванович, зав. лаборатории.  
Вафин Ильядар Юсупович, младший научный сотрудник.  
Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.  
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.  
Тел. 8 (499) 135-80-19.  
E-mail: meshch@fpl.gpi.ru; ildar@fpl.gpi.ru

Статья поступила в редакцию 12 марта 2015 г.

© Мещеряков А. И., Вафин И. Ю., 2015

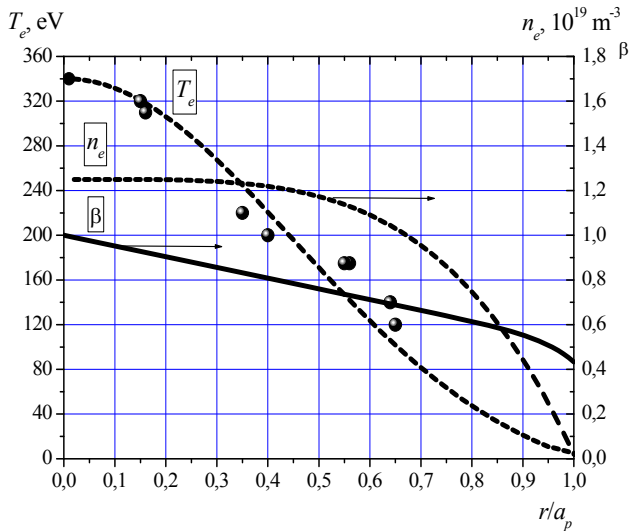


Рис. 1. Профили электронной температуры и плотности (пунктирные линии), измеренные в типичном разряде в режиме омического нагрева после проведения боронизации стенок вакуумной камеры. Приведена также радиальная зависимость  $\beta(r)$  (сплошная линия)

Для вычисления сопротивления шнура использовались результаты, полученные Ю. Н. Днестровским и Д. П. Костомаровым [3]. В работе [3] выражение для удельного сопротивления плазмы имеет вид (в системе СГС):

$$\eta_{DC} = \frac{\eta_H Z_{eff}}{\alpha_E(Z_{eff})}, \quad (2)$$

где  $\eta_H = \frac{4(2\pi)^{1/2}}{3} m_e^{1/2} e^2 \frac{\ln(\Lambda)}{T_e^{3/2}}$  будем называть

удельным сопротивлением водородной плазмы, вычисленное без учета электрон-электронных столкновений,  $Z_{eff}$  — эффективный заряд плазмы, содержащей ионы нескольких сортов,  $\alpha_E(Z_{eff})$  — монотонно возрастающая функция  $Z_{eff}$ . Зависимость числового коэффициента  $\alpha_E(Z_{eff})$  от  $Z_{eff}$  взята из монографии [3]. Расчеты велись методами компьютерного моделирования, при этом кулоновский логарифм вычислялся по формуле из работы [4]:

$$\ln(\Lambda) = 24,4 - \frac{1}{2} \ln(n_e(r)) + \ln(T_e(r)), \quad (3)$$

Для вычисления  $\eta_H(r)$  использовались профили электронной температуры  $T_e(r)$  и плотности  $n_e(r)$ , измеренные в эксперименте (см. рис. 1).

В работе пренебрегалось влиянием тороидально-запертых частиц на проводимость плазмы, так как доля тороидально запертых частиц в стеллараторе Л-2М мала вследствие достаточно большого значения аспектного отношения  $R/r_p = 8,7$ . Влияние стеллараторно запертых частиц на проводимость учитывалось с помощью коэффициента

$\beta$ :  $\eta_{st} = \eta_0/\beta$ . Значение  $\beta$  оценивалось из количества запертых частиц, которые, в свою очередь, определялись с помощью численной процедуры. Зависимость  $\beta$  от радиуса также приведена на рис. 1.

Теперь с учетом влияния стеллараторно-запертых частиц выражение для удельного сопротивления плазмы будет выглядеть следующим образом:

$$\eta_H = \frac{(4\sqrt{2}\pi m_e) e^2 \ln(\Lambda)}{3T_e^{3/2}(r)} \times \frac{1}{\beta}. \quad (4)$$

### Измерение величины $Z_{eff}$ в режиме омического нагрева

Измерение величины  $Z_{eff}$  водородной плазмы проводилось в режиме нагрева индукционным током до выполнения процедуры боронизации и после боронизации вакуумной камеры. На рис. 2 показан временной ход параметров плазмы в типичном импульсе после проведения процедуры боронизации. В интервале с 50 по 60 мс наблюдается постоянство основных параметров. В случае квазистационарного тока вычисление напряженности электрического поля в плазме  $E$  существенно упрощается. Поэтому необходимые для вычисления сопротивления плазменного столба конкретные значения плазменного тока  $I_p$  и напряжения на обходе  $U_L$  брались в момент времени  $t = 55$  мс.

На рис. 3. представлена экспериментальная зависимость  $Z_{eff}$  водородной плазмы от плотности плазмы для двух режимов работы стелларатора — до боронизации (верхняя кривая) и после боронизации вакуумной камеры (нижняя кривая). Видно, что боронизация приводит к существенному, а именно, примерно в два раза снижению эффективного заряда плазмы. Следует отметить также, что в экспериментах на токамаках наблюдается уменьшение  $Z_{eff}$  с ростом плотности плазмы и увеличение  $Z_{eff}$  с ростом тока омического разряда [5]. В нашем случае в режиме нагрева без боронизации вакуумной камеры  $Z_{eff}$  также уменьшается с ростом плотности плазмы. Но в режимах после боронизации вакуумной камеры не наблюдается какой-либо зависимости от плотности плазмы: эффективный заряд плазмы  $Z_{eff}$  остается равным примерно 1,4 при изменении средней плотности от  $n_e = 0,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  до  $n_e = 1,8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ .

Погрешность в определении  $Z_{eff}$  определяется погрешностью измерения  $R_{exp} = \frac{U_L}{I_p}$  и вычисле-

ния  $R_H$ . Измерение напряжения на обходе и тока плазмы — стандартные электротехнические диагностики, имеющие относительную погрешность измерения 2,5 % каждая. Погрешность в опреде-

лении  $R_H$  определяется в основном точностью измерения профиля электронной температуры. Таким образом, при точности измерения электронной температуры с помощью диагностики излучения на второй гармонике электронной циклотронной частоты  $2\omega_{ci}$ , составляющей около 20% [6], погрешность определения  $Z_{eff}$  в данных экспериментах составляет около 40%.

### Вычисление эффективного заряда плазмы по спектру мягкого рентгеновского излучения

В данной работе преследовалась цель отладки и тестирования спектрометра мягкого рентгеновского излучения, который в дальнейшем предполагалось использовать для измерений спектров в режиме электронного циклотронного резонансного

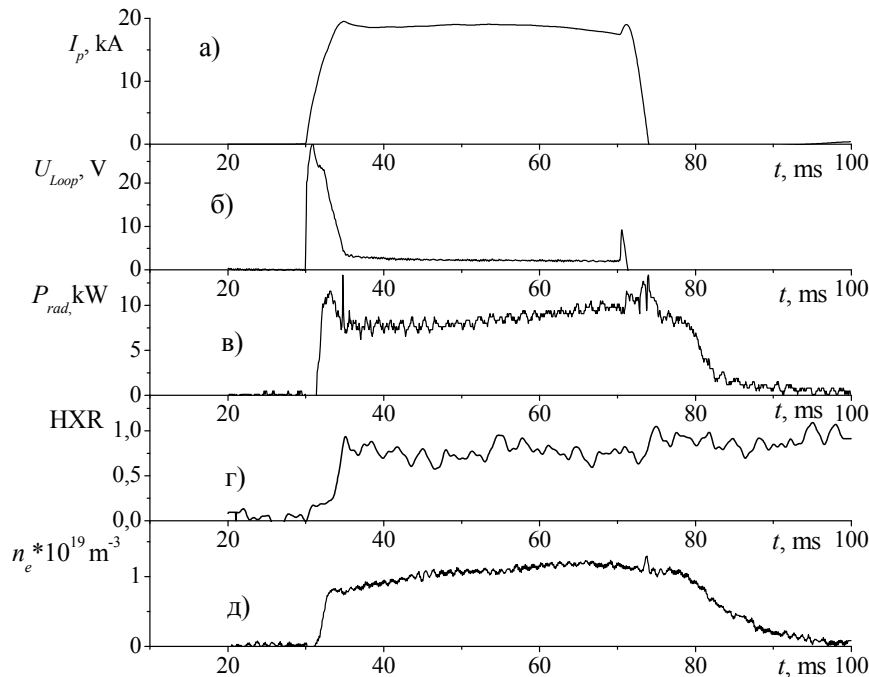


Рис. 2. Временной ход параметров плазмы в типичном импульсе омического разряда до и после проведения процедуры боронизации:  $I_p$  — полный ток омического нагрева,  $U_{loop}$  — напряжение на обходе,  $P_{rad}$  — мощность радиационных потерь, HXR — интенсивность жесткого рентгеновского излучения,  $n_e$  — средняя по центральной хорде плотность плазмы

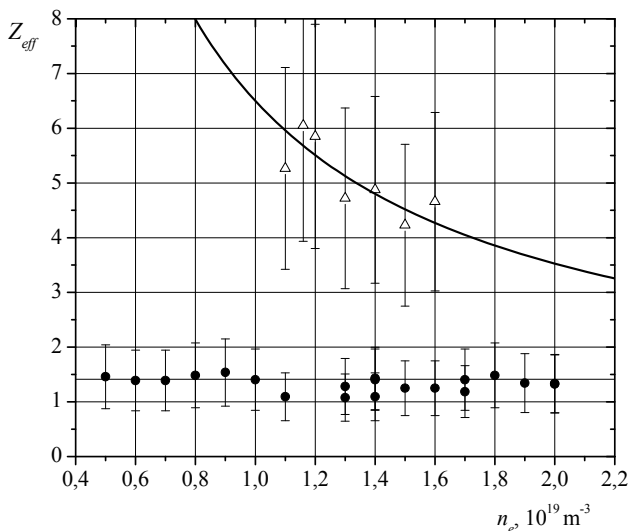


Рис. 3. Зависимость эффективного заряда плазмы от средней концентрации частиц в двух режимах омического разряда: без боронизации (верхняя кривая) и с боронизацией вакуумной камеры стелларатора Л-2М (нижняя линия)

(ЭЦР) нагрева плазмы на второй гармонике электронной циклотронной частоты.

Вычисление эффективного заряда плазмы по спектру мягкого рентгеновского излучения носят оценочный характер. Это связано с тем, что интерпретация результатов измерений зависит от априорной информации о составе примесей и, соответственно, от корректного выбора модели. Поскольку сведений о составе плазмы было недостаточно, расчет  $Z_{eff}$  проводился из предположения о доминировании единственной примеси, а именно, ионов бора с зарядом +5. Исходя из этого, значение  $Z_{eff}$  вычислялось по формуле из работы [7]:

$$Z_{eff} = Z_i(Z_i - Z_p)\alpha_{iz} + Z_p \quad (5)$$

Здесь  $Z_i$  и  $Z_p$  — заряды иона доминирующей примеси и протона соответственно,  $\alpha_{iz}$  — относительное содержание примесей в плазме, которое вычислялось по формуле из [7]:

$$\alpha_{iz} = \frac{\zeta - Z_p}{\gamma Z_i^2 - Z_i Z_p}, \quad (6)$$

где  $\zeta$  — фактор превышения,  $Z_i$  и  $Z_p$  — заряды иона доминирующей примеси и протона соответственно,  $\gamma$  — множитель, показывающий, во сколько раз рентгеновское излучение данного иона превышает тормозное:

$$(dW/dE)_{tot} = \gamma(dW/dE)_{br.}$$

Его величина в виде  $\gamma - 1$  равна, согласно работе [7]:

$$\gamma - 1 = \frac{\xi}{n^3} \frac{\chi_i}{T_e} \exp \frac{\chi_i}{T_e} + \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{2\chi_H}{T_e} \frac{Z_i^2}{(n+\nu)^3} \exp \left( \frac{Z_i^2}{(n+\nu)^2} \frac{\chi_H}{T_e} \right), \quad (7)$$

где  $Z_i$  — заряд иона до рекомбинации,  $\chi_i$  — потенциал ионизации примеси,  $\chi_H$  — энергия ионизации атома водорода (13,6 эВ),  $n$  — главное квантовое число,  $\xi$  — количество недостающих электронов на оболочке,  $T_e$  — электронная температура. Величина фактора превышения  $\zeta$  была найдена путем сравнения экспериментально измеренного спектра в режиме омического нагрева со спектром, полученным в результате моделирования тормозного излучения чистой водородной плазмы (см. рис. 4).

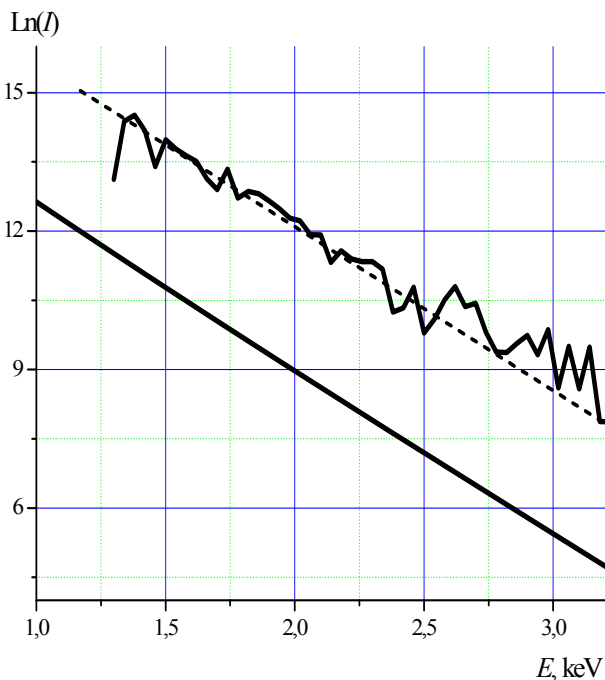


Рис. 4. Экспериментально измеренный спектр мягкого рентгеновского излучения, представленный в полулогарифмическом масштабе. Сплошная линия — расчетный спектр. Наклон спектра соответствует электронной температуре 0,3 кэВ

В итоге по спектру мягкого рентгеновского излучения были вычислены значения эффективного заряда плазмы для различных режимов омического нагрева. Для удобства анализа результаты расчетов  $Z_{eff}$ , полученные двумя способами, были представлены на одном графике (рис. 5). Здесь звездочками обозначены значения эффективного заряда, полученные по излучению, а кружками — из электропроводности плазменного шнура. Как видно из рис. 5, при значениях фактора превышения меньших 20 значения совпадают в пределах ошибок измерений. При этом необходимо заметить, что на графике значения эффективного заряда  $Z_{eff} \approx 4,7$  и  $Z_{eff} \approx 1,5$ , отвечающие значению фактора превышения  $\zeta = 45$ , получены в эксперименте с дополнительным напуском неона. В этом случае, очевидно, что предположение о доминировании примеси бора в плазме заведомо не верно. Этим и объясняется большое отличие от значения, полученного из проводимости плазмы.

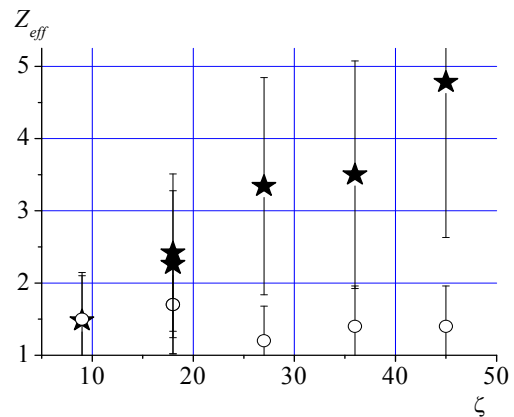


Рис. 5. Результат расчетов эффективного заряда плазмы по спектру мягкого рентгеновского излучения (обозначено звездочками) и по электропроводности плазменного шнура (обозначено точками). По оси ординат отложены значения эффективного заряда, по оси абсцисс — фактор превышения

### Заключение

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом.

1. Измерение сопротивления плазменного шнура было использовано для определения эффективного заряда плазмы в двух режимах омического разряда стелларатора Л-2М: до и после проведения процедуры боронизации вакуумной камеры. В режимах без боронизации вакуумной камеры  $Z_{eff}$  принимает значения от 4 до 6 и уменьшается с ростом плотности. С введением процедуры боронизации значения эффективного заряда, измеренные по проводимости, лежат в интервале  $Z_{eff} = 1,5 - 2$  и не проявляют зависимость от плотности.

2. Сравнение значений эффективного заряда, вычисленных по спектру мягкого рентгеновского

излучения и по электропроводности, показывает, что в случае, когда фактор превышения меньше 20, оба метода достаточно хорошо согласуются. И тогда имеется возможность вычислять эту величину и при электронном циклотронном режиме нагрева плазмы. В импульсах, когда фактор превышения больше значения 20, допущение о доминировании одной примеси, а именно, бора, не верно, и вышеизложенный метод требует более сложного анализа.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, проект 15-02-09192-а.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Akulina D. K., Andryukhina Eh. D., Voronov G. S., et al. // Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research IAEA. 1979. Vol. 2. P. 287 (Vienna, IAEA).
2. Мещеряков А. И., Акулина Д. К., Батанов Г. М. и др. // Физика плазмы. 2005. Т.31. № 6. С. 1.
3. Днестровский Ю. Н., Костомаров Д. П. Математическое моделирование плазмы. — М.: Наука. 1993.
4. Сивухин Д. В. Вопросы теории плазмы. Под ред. Леонтовича М. А. — М.: Атомиздат, 1964. Вып. 4. С. 81.
5. Бобровский Г. А., Разумова К. А., Санников В. В. // Физика плазмы. 1976. Т. 2. Вып. 6. С. 897.
6. Акулина Д. К., Батанов Г. М., Бережецкий М. С. и др. // Физика плазмы. 2003. Т. 29. С. 1108.
7. von Goeler S., Stodiek W., Eubank H., et al. // Nuclear Fusion. 1975. V. 15. P. 301.

## Measurement of the plasma effective charge on the soft X-ray spectrum and on conductivity of plasma at the L-2M stellarator

A. I. Meshcheryakov and I. Yu. Vafin

Prokhorov General Physics Institute, RAS  
38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia  
E-mail: meshch@fpl.gpi.ru; ildar@fpl.gpi.ru

Received March 12, 2015

*An effective charge of plasma in the L-2M stellarator has been measured by two methods. Consideration is given to a resistance of the plasma filament and also the soft X-ray spectrum. In absence of vacuum chamber boronization, a value of  $Z_{\text{eff}}$  was equal to 4—6. After boronization, a value of  $Z_{\text{eff}}$  was equal to 1.5—2.*

PACS: 52.50.-b

*Keywords:* stellarator, plasma, effective charge, measurement, vacuum chamber.

## REFERENCES

1. D. K. Akulina, Eh. D. Andryukhina, G. S. Voronov, et al., in *Proc. Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research IAEA. Vol. 2.* (Vienna, IAEA, 1979). P. 287.
2. A. I. Meshcheryakov, D. K. Akulina, G. M. Batanov, et al., *Plasma Physics Reports* **31**, 1 (2005).
3. Yu. N. Dnestrovsky and D. P. Kostomarov, *Mathematic Modeling of Plasma* (Nauka, Moscow, 1993) [in Russian].
4. D. V. Sivukhin, in *Book: Problems of Plasma Theory. Issue 4.* Ed. by M. A. Leontovich (Atomizdat, Moscow, 1964) [in Russian].
5. G. A. Bobrovsky, K. A. Razumova, and V. V. Sannikov, *Plasma Physics Reports*, **2**, 897 (1976).
6. D. K. Akulina, G. M. Batanov, M. S. Berezhetskii, et al., *Plasma Physics Reports*, **29**, 1108 (2003).
7. S. von Goeler, W. Stodiek, H. Eubank, et al., *Nuclear Fusion* **15**, 301 (1975).