

Физика плазмы и плазменные методы

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

Проведение процедуры боронизации стенок вакуумной камеры привело к тому, что существенно изменился состав плазмы в рабочих импульсах стелларатора Л-2М. Это, в свою очередь, вызвало необходимость вычисления эффективного заряда плазмы. В режиме омического нагрева был измерен эффективный заряд плазмы по проводимости плазменного шнура и из спектра мягкого рентгеновского излучения. Обнаружено сильное влияние боронизации на значение эффективного заряда плазмы. Сравнение значений эффективного заряда плазмы, измеренного двумя способами позволило определить условия, в которых оба метода дают хорошее согласие, и появляется возможность оценивать эффективный заряд плазмы из спектральных измерений.

PACS: 52.50.-b

Ключевые слова: физика плазмы, высокотемпературная плазма, стелларатор, боронизация, примеси в плазме, эффективный заряд плазмы, компьютерное моделирование, рентгеновская спектроскопия.

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

На стеллараторе Л-2М уже проводились измерения эффективного заряда плазмы [1], но 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 $n_e = (0,5 \div 1,7) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

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

Мещеряков Алексей Иванович, зав. лабораторией.
Вафин Ильдар Юсупович, старший научный сотрудник.
Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН.
Россия, 119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38.
Тел. 8 (499) 135-80-19. Факс 8 (499) 135-80-11.
E-mail: meshch@fpl.gpi.ru; ildar@fpl.gpi.ru

Статья поступила в редакцию 6 апреля 2015 г.

© Мещеряков А. И., Вафин И. Ю., 2015

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 его сравнении с сопротивлением, измеренным в режиме омического нагрева $R_{\text{exp}} = \frac{U_L}{I_p}$, где U_L — напряжение на обходе, I_p — плазменный ток (рис. 1).

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

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

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, $\alpha_E(Z_{\text{eff}})$ — монотонно возрастающая функция Z_{eff} . Зависимость числового коэффициента $\alpha_E(Z_{\text{eff}})$ от Z_{eff} взята из монографии [3]. Расчеты велись методами компьютерного моделирования, при этом кулоновский логарифм вычислялся по формуле [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 (рис. 1).

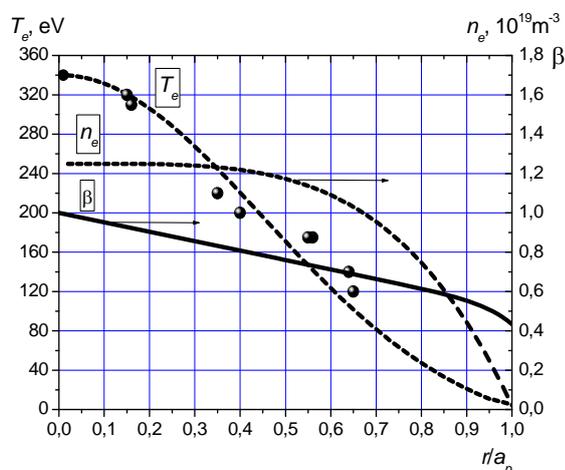


Рис. 1. Профили электронной температуры и плотности (пунктирные линии), измеренные в типичном разряде в режиме омического нагрева после проведения боронизации стенок вакуумной камеры. Приведена также радиальная зависимость $\beta(r) = \sigma/\sigma_0$ (сплошная линия)

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

Тогда, с учетом влияния стеллараторно-запертых частиц, выражение для удельного сопротивления водородной плазмы (2) будет выглядеть так:

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

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 величины 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, примерно в два три 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 остается равным примерно $Z_{\text{eff}} \sim 1,4$ при изменении средней плотности от $n_e = 0,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ до $n_e = 1,8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

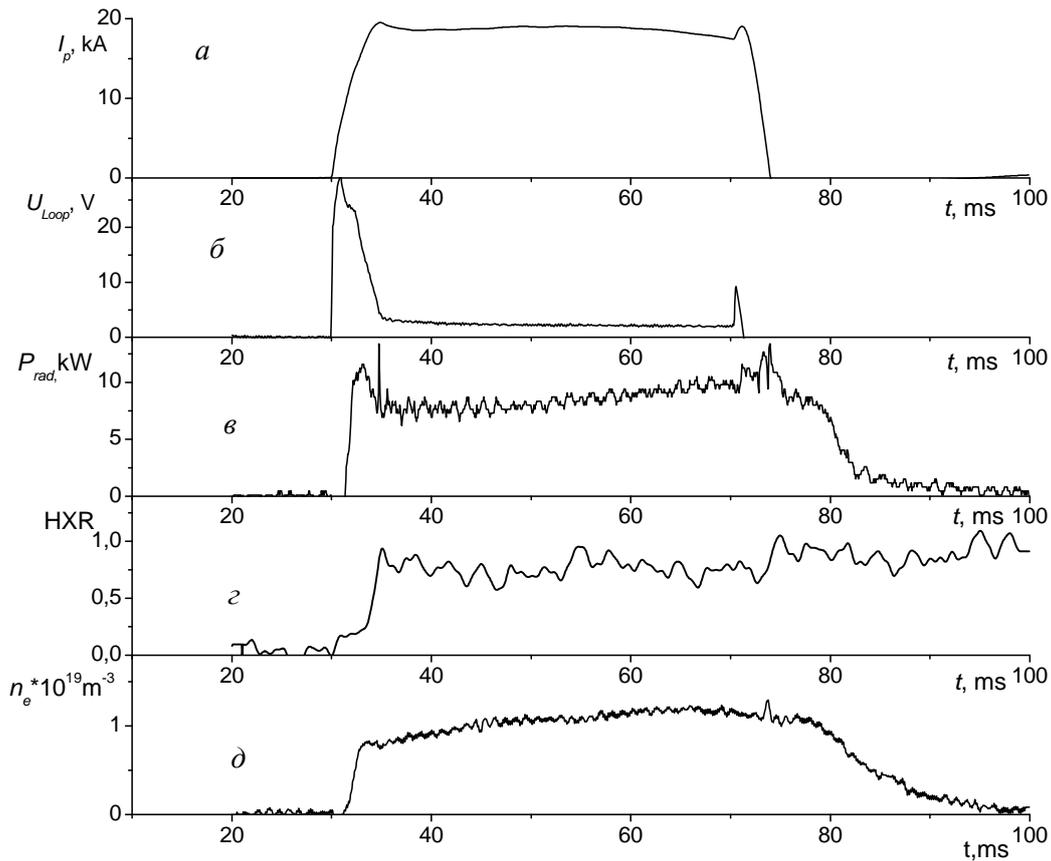


Рис. 2. Временной ход параметров плазмы в типичном импульсе омического разряда после проведения процедуры боронизации: I_p — полный ток омического нагрева, U_{loop} — напряжение на обходе, P_{rad} — мощность радиационных потерь, HXR — интенсивность жесткого рентгеновского излучения, n_e — средняя по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

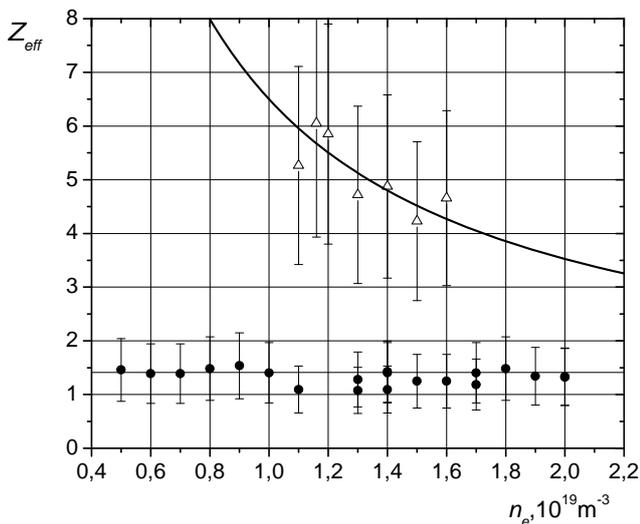


Рис. 3. Зависимость эффективного заряда плазмы от средней концентрации частиц в двух режимах омического разряда: без боронизации (верхняя кривая) и с боронизацией вакуумной камеры стелларатора Л-2М (нижняя линия)

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

числения R_H . Измерение напряжения на обходе и тока плазмы — стандартные электротехнические диагностики, имеющие относительную погрешность измерения 2,5 % каждая. Погрешность в определении 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, тестирования спектрометра мягкого рентгеновского излучения, который в дальнейшем предполагалось использовать для измерений спектров в режиме электронного циклотронного резонансного (ЭЦР) нагрева плазмы на второй гармонике электронной циклотронной частоты. Вычисление эффективного заряда плазмы по спектру мягкого рентгеновского излучения носят оце-

ночный 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 [7]:

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

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

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

где ζ — фактор превышения, Z_i и Z_p — заряды иона доминирующей примеси и протона соответственно, γ — 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, χ_i — потенциал ионизации примеси, χ_H — энергия ионизации атома водорода (13,6 эВ), n — главное квантовое число, ξ — количество недостающих электронов на оболочке, T_e — электронная температура. Величина фактора превышения ζ 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). В итоге по спектру мягкого рентгеновского излучения были вычислены значения эффективного заряда плазмы для различных режимов омического нагрева. Для удобства результаты расчетов Z_{eff} , полученные двумя способами были представлены на один график (рис. 5). На графике звездочками обозначены значения эффективного заряда, полученные по излучению, а кружками — из электропроводности плазменного шнура. Как видно из рис. 5, при значениях фактора превышения мень-

ших 20, значения эффективного заряда плазмы совпадают в пределах ошибок измерений. Здесь 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.

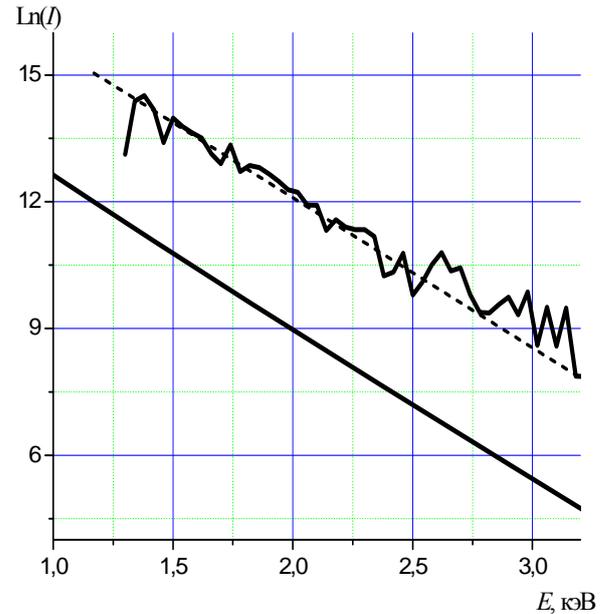


Рис. 4. Экспериментально измеренный спектр мягкого рентгеновского излучения, представленный в полулогарифмическом масштабе. Сплошная линия — расчетный спектр. Наклон спектра соответствует электронной температуре 0,3 кэВ

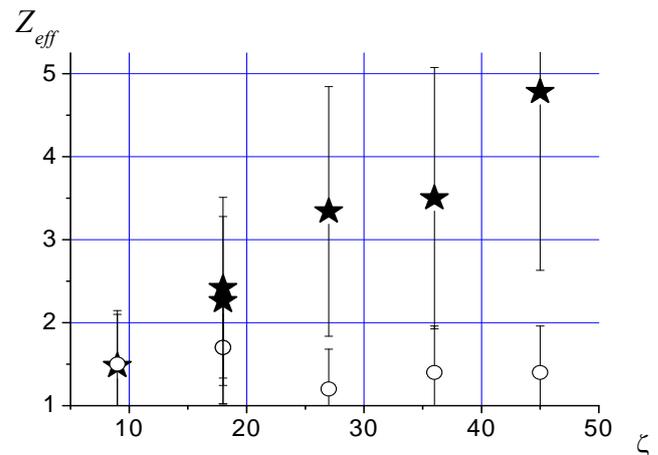


Рис. 5. Результат расчетов эффективного заряда плазмы по спектру мягкого рентгеновского излучения (обозначено звездочками) и по электропроводности плазменного шнура (обозначено точками). По оси ординат отложены значения эффективного заряда, по оси абсцисс — фактор превышения

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 L-2M, а именно, 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 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 (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., Бережнецкий 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.

Estimations of the plasma effective charge at the L-2M stellarator after boronization of its vacuum chamber on the basis of measurements of a soft X-ray spectrum and plasma conductivity

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 April 6, 2015

Boronization of the vacuum chamber walls resulted in a considerable change in the impurity composition of plasma generated in the working pulses at the L-2M stellarator and, consequently, in the plasma effective charge. We present the results of measurements of the plasma effective charge carried out in the OH operation mode by two methods: from measuring plasma conductivity and from the SXR spectrum of plasma emission. We compared the values of plasma effective charge obtained by these two methods and qualified the conditions in which the two values are in good agreement. Under these conditions, the effective charge of plasma can be correctly estimated from spectral measurements.

PACS: 52.50.-b

Keywords: plasma physics, high-temperature plasma, stellarator, boronization, plasma impurities, effective charge of plasma, computer simulations, SXR spectrometry.

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).