

УДК 533.9

## ЭМПИРИЧЕСКАЯ ФОРМУЛА ДЛЯ ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ В ОМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ В ТОКАМАКЕ Т-10

Н.А. Кирнева<sup>1, 2</sup>, А.А. Мартынов<sup>3</sup>, Ю.Д. Павлов<sup>1</sup>, В.М. Трухин<sup>1</sup>, Е.В. Трухина<sup>1</sup><sup>1</sup>НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия<sup>3</sup>Географический институт и Центр изучения изменений климата Ёизгер, Бернский университет, Берн, Швейцария

При прогнозировании ожидаемых результатов экспериментов или отклика диагностической системы удобно иметь эмпирические формулы радиальных распределений параметров плазмы, позволяющие сопоставить предсказываемые моделью профили с результатами, имеющимися в базе данных. В токамаке Т-10 в омических режимах получена эмпирическая формула, описывающая профиль электронной температуры. Показано, что форма профиля электронной температуры зависит от величины полного тока плазмы и не зависит от средней плотности плазмы. Профили электронной температуры, рассчитанные по формуле, находятся в удовлетворительном согласии с результатами измерений, представленных в базе данных Т-10.

**Ключевые слова:** омический режим, электронная температура, профиль температуры.

## EMPIRICAL FORMULA FOR PLASMA ELECTRON TEMPERATURE PROFILE IN T-10 OHMIC DISCHARGES

N.A. Kirneva<sup>1, 2</sup>, A.A. Martynov<sup>3</sup>, Yu.D. Pavlov<sup>1</sup>, V.M. Trukhin<sup>1</sup>, E.V. Trukhina<sup>1</sup><sup>1</sup>NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia<sup>3</sup>Oeschger Centre for Climate Change Research, University of Bern, Bern, Switzerland

It is useful to have empirical formulas for plasma parameters' distribution to test modeling results or response of diagnostics. Empirical formula for electron temperature distribution has been developed for ohmic discharges in T-10 tokamak. Electron temperature profile shape has been found to be dependent on the plasma current value and independent on the value of the average plasma density. Applicability of the derived formula has been checked using T-10 database in a wide range of the discharge parameters.

**Key words:** ohmic regime, electron temperature, temperature profile.

### ВВЕДЕНИЕ

Установка Т-10 — круглый лимитерный токамак с большим радиусом плазменного шнура  $R = 1,5$  м, малым радиусом плазмы  $a = 0,3$  м, малым радиусом камеры  $a_k = 0,4$  м. Для измерения электронной температуры плазмы в Т-10 в настоящее время используется многоканальная диагностика, основанная на измерении интенсивности излучения на второй гармонике электронно-циклотронной частоты, и диагностика, основанная на измерении спектров мягкого рентгеновского излучения (в диапазоне энергии от 1 до 25 кэВ). В некоторых случаях, например, для проведения моделирования возможных параметров плазмы в предстоящих экспериментах или моделирования отклика диагностических систем удобно иметь некий скейлинг, эмпирическую формулу, которая позволит сопоставить предсказываемые моделью профили температуры с результатами измерений, уже имеющимися в базе данных. Для того чтобы получить такую формулу для омических режимов, на установке Т-10 были проведены специальные эксперименты, результат которых представлен в этой статье.

### УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились на Т-10 в дейтериевой плазме. Электронная температура плазмы измерялась на стационарной стадии разряда при неизменных во времени полном токе плазмы  $I_p$  и значении тороидального магнитного поля  $B_T$ . Линейная средняя плотность плазмы, определяемая по центральной хорде СВЧ-интерферометра, поддерживалась постоянной во времени, что обеспечивалось с помощью системы обратных связей. Малый радиус плазмы не изменялся от импульса к импульсу и составлял  $a = 0,3$  м.

В таблице приведены параметры экспериментальных режимов ( $q_L$  — значение фактора запаса устойчивости на границе,  $q_L = \frac{5a^2 B_T}{I_p R} 10^6$ , где все величины приведены в системе СИ). Для удобства в таб-

лице приведены два значения средней плотности:  $\bar{n}_e$  — линейная средняя плотность, измеренная вдоль центральной хорды и рассчитанная на радиус лимитера,  $(\bar{n}_e)_k$  — линейная средняя плотность, рассчитанная на радиус камеры токамака. Значение линейной средней плотности  $(\bar{n}_e)_k$  приводится для удобства, поскольку именно оно используется на Т-10 в системе обратной связи по плотности и записывается в базу данных установки.

Параметры экспериментальных режимов

$I_p$ , кА	$B_T$ , Тл	$q_L$	$\bar{n}_e$ , $10^{19} \text{ м}^{-3}$	$(\bar{n}_e)_k$ , $10^{19} \text{ м}^{-3}$
75	2,4	9,6	2	1,5
150	2,4	4,8	2	1,5
250	2,4	2,9	2	1,5
250	“ “	“ “	4,93	3,7

Кроме того, в каждом из режимов, представленных в таблице, проведено исследование зависимости формы профиля температуры от плотности плазмы в следующем диапазоне плотности:

$$I_p = 75 \text{ кА}, \bar{n}_e = (1,05—2)10^{19} \text{ м}^{-3} = (0,4—0,75)n_{Gw};$$

$$I_p = 150 \text{ кА}, \bar{n}_e = (1,3—4,0)10^{19} \text{ м}^{-3} = (0,25—0,75)n_{Gw};$$

$$I_p = 250 \text{ кА}, \bar{n}_e = (1,85—5,3)10^{19} \text{ м}^{-3} = (0,2—0,6)n_{Gw}.$$

Здесь  $n_{Gw} = I_p/(\pi a^2)$  — плотность Гринвальда [1] ( $10^{20} \text{ м}^{-3}$ , МА, м). Рассматриваемый диапазон плотности плазмы был ограничен сверху значением плотности  $(0,6—0,75)n_{Gw}$ , поскольку дальнейшее увеличение плотности может приводить к развитию МГД-неустойчивостей и, как следствие, к деформации профиля электронной температуры [2].

При выполнении данной работы для измерения с помощью рентгеновского спектрометра (ППД) использовались два детектора: с горизонтальной и вертикальной линиями наблюдения. Интенсивность излучения из плазмы на второй гармонике электронно-циклотронной частоты (ЕСЕ) определялась по восьми измерительным каналам. Перевод относительных единиц интенсивности ЕСЕ-излучения в абсолютные значения температуры (в электронвольтах) проводился на основании сопоставления результатов измерений центральных значений электронной температуры, полученных по спектрам рентгеновского излучения и по сигналу ЕСЕ-излучения из центра плазмы. Взаимная калибровка каналов ЕСЕ-измерений осуществлялась за счёт небольшого изменения тороидального магнитного поля в двух последовательных импульсах таким образом, чтобы перекрылись области измерения по двум соседним измерительным каналам.

Эффективный заряд плазмы в рассматриваемых режимах менялся в интервале  $Z_{эф} = 2—2,5$ .

### ЗАВИСИМОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ

На рис. 1 показана зависимость центральной электронной температуры плазмы  $T_e(0)$  от линейной средней плотности для режимов с разными значениями тока плазмы (см. таблицу). При высоком значении  $q_L$ , т.е. в режиме с низким током плазмы (рис. 1, а), центральная температура плазмы не зависит от

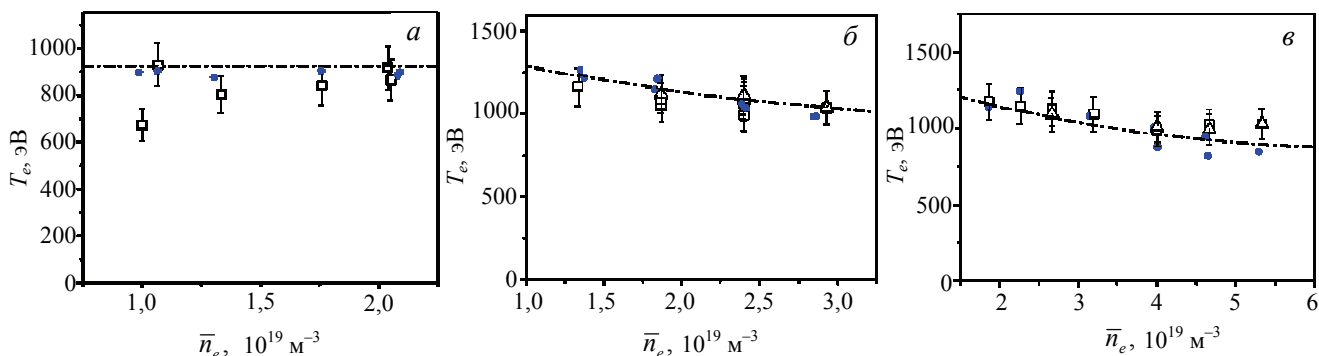


Рис. 1. Зависимость центральной электронной температуры плазмы от линейной средней плотности в режимах с током плазмы 75 (а), 150 (б) и 250 кА (в): • — измерения по диагностике ЕСЕ-излучения; □, Δ — измерения по спектрам мягкого рентгеновского излучения (□ — горизонтальная линия наблюдения, Δ — вертикальная линия наблюдения); — — зависимость, полученная с использованием аппроксимационной формулы (1)

плотности во всём исследованном интервале плотности. В режимах с низким  $q_L$  центральная температура плазмы падает с ростом линейной средней плотности (рис. 1, б, в).

Такое изменение центральной электронной температуры с плотностью плазмы хорошо описывается следующей зависимостью:

$$T_e(0) = A(I_p)((\bar{n}_e)_к + 0,5)^{-B(I_p)} = A(I_p)(0,75 \bar{n}_e + 0,5)^{-B(I_p)}, \quad (1)$$

где

$$A(I_p) = 1400(1 - \exp(-(I_p - 48)/25));$$

$$B(I_p) = 0,3(1 - \exp(-(I_p - 75)/25)),$$

( $I_p$ , кА;  $\bar{n}_e$ ,  $10^{19} \text{ м}^{-3}$ ). На рис. 1 видно, что значения центральной электронной температуры плазмы, рассчитанные по формуле (1), хорошо согласуются с экспериментальными данными. Отклонение не превышает экспериментальной ошибки.

### ИЗМЕНЕНИЕ ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ

Измерение профиля электронной температуры плазмы было проведено в четырёх режимах, представленных в таблице. Измерения профиля температуры с помощью рентгеновского спектрометра проводились при взаимно независимом изменении хорды наблюдения по обоим диагностическим каналам — вертикальному и горизонтальному — от импульса к импульсу. Повторяемость режима контролировалась по напряжению на обходе тора, величине радиационных потерь, сигналам излучения по спектральным линиям, величине диамагнитного сигнала, линейной средней плотности плазмы. Результаты измерения показаны на рис. 2.

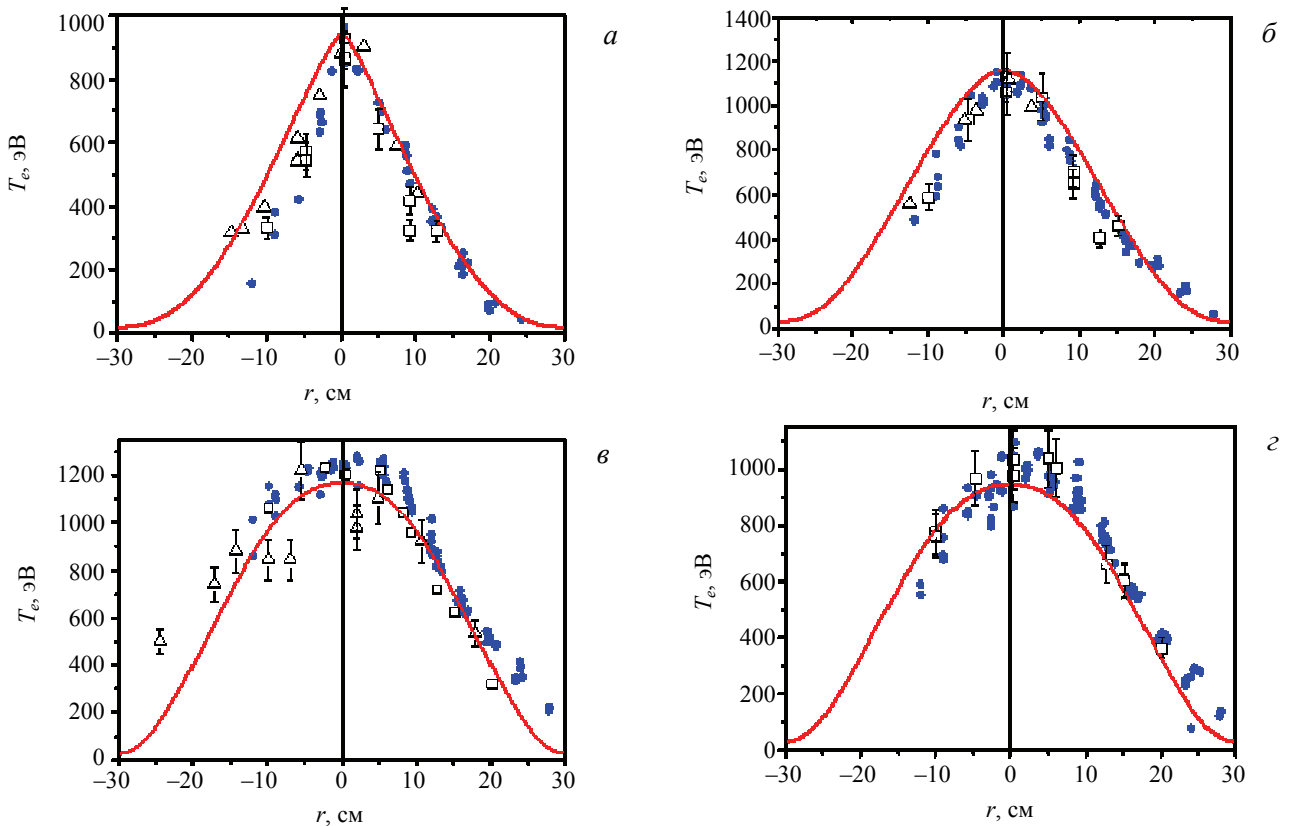


Рис. 2. Профиль электронной температуры плазмы в режимах с плотностью плазмы  $\bar{n}_e = 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  и током плазмы 75 (а), 150 (б) и 250 кА (в);  $\bar{n}_e = (4,8-4,9)10^{19} \text{ м}^{-3}$ ,  $I_p = 250$  кА, (г): • — измерения по диагностике ЕСЕ-излучения; □ и Δ — измерения по спектрам мягкого рентгеновского излучения (□ — горизонтальная линия наблюдения, Δ — вертикальная линия наблюдения); — зависимость, полученная с использованием аппроксимационной формулы (2)

Во всех представленных режимах профиль температуры плазмы хорошо (отклонения меньше ошибки, связанной с погрешностью измерений и воспроизводимостью разряда) описывается формулой

$$T_e(r) = T_e(0) \left( 1 - \left( \frac{r}{a} \right)^{\alpha(I_p)} \right)^{\beta(I_p)} + T_e(a), \tag{2}$$

где  $\alpha(I_p) = \frac{I_p^{0,435}}{5}$ ;  $\beta(I_p) = 2,5 - \frac{(I_p - 112,5)^2}{50\,000}$ ;  $T_e(0)$  определена по формуле (1). Небольшая поправка

$T_e(a)$  вводится для того, чтобы избежать равенства нулю температуры на границе. Значение  $T_e(a)$  определяется по измерениям с помощью зондов, установленных на лимитере, и обычно составляет 20—40 эВ [3].

Полученная формула отличается от часто используемого параболического распределения температуры по радиусу или зависимости вида квадратичной параболы, поскольку показатели степени зависят от величины тока плазмы. Форма профиля температуры  $T_e(r)/T_e(0)$  оказывается независимой от средней плотности плазмы. Это подтверждается относительным изменением интенсивности ЕСЕ-излучения, измеренной по каждому каналу (хорде измерений) (рис. 3). Как известно, область измерений ЕСЕ-излучения определяется величиной магнитного поля и не зависит от плотности (в рассматриваемых случаях условие черноты выполняется), следовательно, одинаковое изменение интенсивности ЕСЕ-излучения с ростом плотности плазмы означает подобное изменение всего профиля без его деформации.

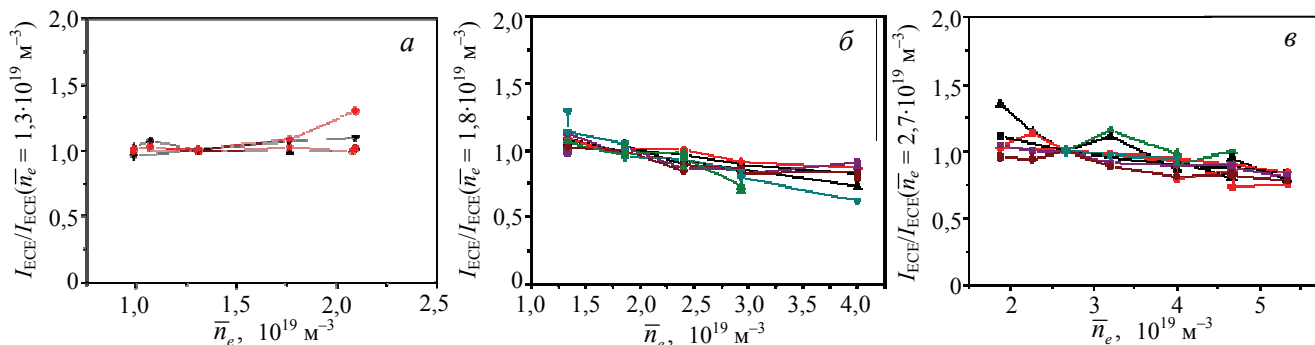


Рис. 3. Относительное изменение интенсивности излучения по разным хордам измерений: -3 (▲), 0 (●), 5 (▼), 8,5 см (◆) для режима с током плазмы 75 кА (а); -3 (▲), 5 (■), 8,5 (◆), 12 (■), 16 (●), 19,5 (▼), 24 см (▲), 150 кА (б); -3 (▲), 0 (●), 5 (■), 8,5 (◆), 12 (■), 16 (●), 20 (▲), 24 см (▼), 250 кА (в)

Следует отметить, что при дальнейшем увеличении плотности вплоть до предельной профиль электронной температуры может уплощаться или меняться в области возможного развития магнитных островов. В таких случаях нужно либо вводить поправки, пользуясь исходными данными, либо (что лучше) проводить специальные измерения.

Рассмотренные режимы выполнены при одном значении тороидального магнитного поля  $B_T = 2,4$  Тл. Поэтому формулы (1) и (2) содержат как параметр величину полного тока плазмы. Однако более адекватным параметром является безразмерная величина — фактор запаса устойчивости на границе плазмы,  $q_L$ . Поэтому для разрядов с другим значением тороидального магнитного поля или малого

радиуса плазмы в формулы (1) и (2) вместо  $I_p$  нужно подставлять величину  $I = \frac{5a^2 B_T}{Rq_L} 10^3$  кА, где

$a = 0,3$  м,  $B_T = 2,4$  Тл,  $R = 1,5$  м и  $q_L$  — фактор запаса устойчивости на границе в исследуемом разряде. Тогда

$$I = \frac{720}{q_L}. \tag{3}$$

В полученную эмпирическую формулу не входят геометрические параметры установки, а отношение  $r/a$  в формуле (2) может быть заменено на текущий радиус магнитной поверхности  $\rho$ , поэтому можно ожидать, что формула может быть применена и для других установок токамак в омических режимах. Однако в каждом случае это утверждение требует дополнительной проверки с использованием результатов из базы данных конкретной установки.

## СРАВНЕНИЕ РАСЧЁТНЫХ ПРОФИЛЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ С ДАННЫМИ ИЗМЕРЕНИЙ В ДРУГИХ РЕЖИМАХ

Достоверность полученной эмпирическим путём формулы была проверена на импульсах из базы данных Т-10 с различными параметрами плазменного разряда.

На рис. 4 показано сравнение результатов измерений с профилем электронной температуры, определённым по формулам (1), (2) (с заменой (3)).

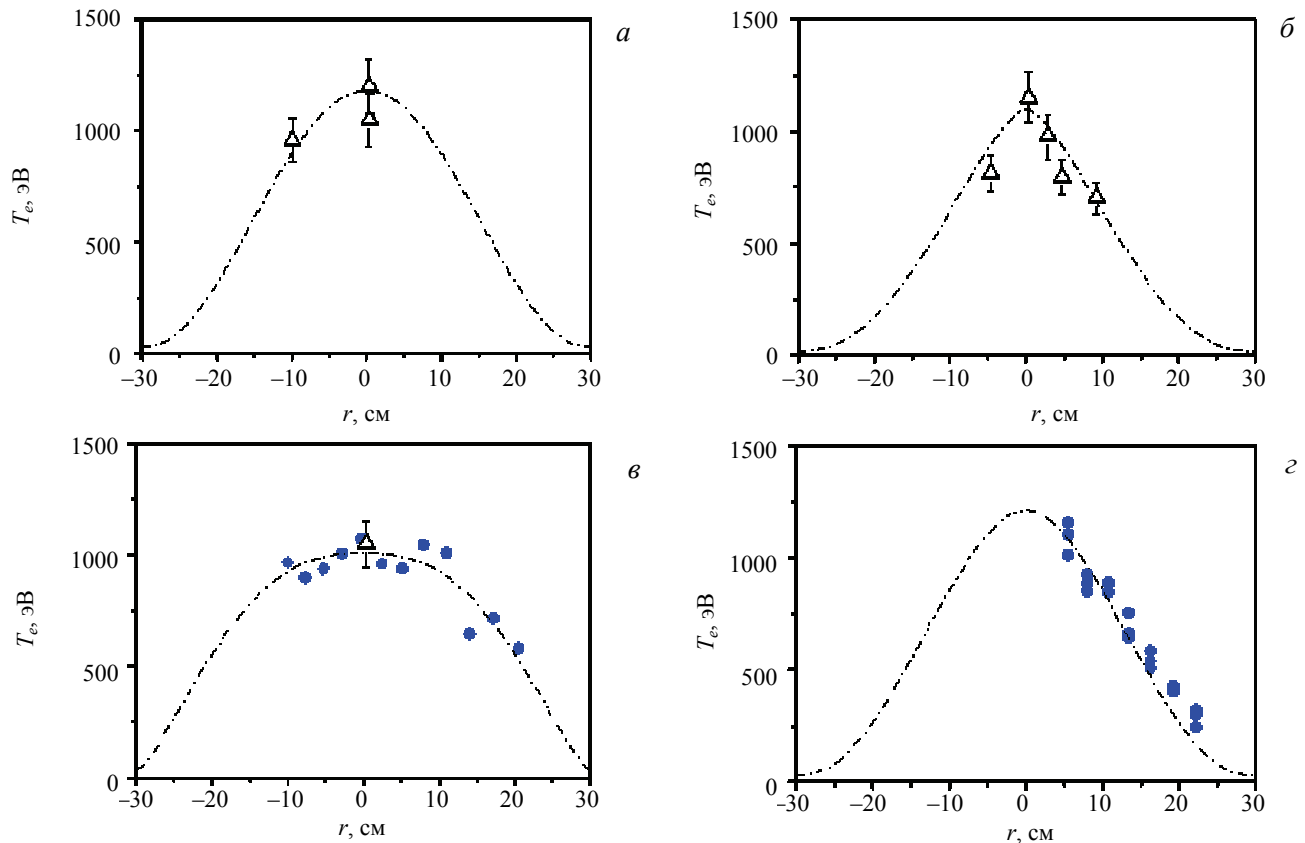


Рис. 4. Сравнение профилей электронной температуры, измеренных в экспериментальных режимах Т-10, с предсказаниями эмпирической формулы: *a* —  $I_p = 200$  кА,  $B_T = 2,45$  Тл,  $\bar{n}_e = 1,4 \cdot 10^{19}$  м<sup>-3</sup>; *б* —  $I_p = 100$  кА,  $B_T = 2,45$  Тл,  $\bar{n}_e = 1,3 \cdot 10^{19}$  м<sup>-3</sup>; *в* —  $I_p = 294$  кА,  $B_T = 2,05$  Тл,  $\bar{n}_e = 2,8 \cdot 10^{19}$  м<sup>-3</sup>; *г* —  $I_p = 150$  кА,  $B_T = 2,28$  Тл,  $\bar{n}_e = 1,2 \cdot 10^{19}$  м<sup>-3</sup>;  $\Delta$  — результат измерений с помощью рентгеновского спектрометра;  $\bullet$  — результат обработки измерений ЕСЕ-излучения; --- — профили, полученные по эмпирической формуле (2)

### ВЫВОДЫ

На установке Т-10 в омическом режиме получена эмпирическая формула для профиля электронной температуры плазмы, применимость которой проверена с использованием импульсов из базы данных Т-10 в широком диапазоне параметров разряда. Продемонстрировано хорошее согласие полученных по формуле профилей температуры с результатами измерений. Таким образом, полученная эмпирическая формула может быть использована при моделировании омических режимов Т-10 для анализа сопоставимости результатов моделирования с экспериментальными данными, а также в других задачах (например, при оценке возможного отклика диагностических систем), которые не требуют повышенной детализации в описании профилей температуры плазмы.

Необходимое дополнение:

авторы считают необходимым отметить, что основная часть работы, представленной в этой статье, проведена под руководством и при лидирующем участии Ю.В. Есипчука;

авторы выражают благодарность Плоскиреву Г.Н. за предоставленные результаты ЕСЕ-измерений и сотрудникам диагностического комплекса Т-10 за участие в проведении экспериментов.

Работа выполнена при поддержке Госкорпорации «Росатом» (контракт № Н.4х.44.90.13.1101).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Greenwald M. et al.** — Nuclear Fusion, 1988, vol. 28, p. 2199.
2. **Аликаев В.В., Борщеговский А.А., Волков В.В. и др.** — Физика плазмы, 2000, vol. 26, p. 991.
3. **Vershkov V.A. et al.** — In: Proc. of 28th EPS Conf. on Control. Fusion and Plasma Phys. Funchal, ECA, 18—22 June 2001, vol. 25A, p. 1273—1276.



Наталья Александровна Кирнева, начальник лаборатории, к.ф.-м.н., лауреат премий им. И.В. Курчатова; НИЦ «Курчатовский институт», пл. Академика Курчатова, д. 1, 123182, Москва, Россия; доцент каф. Физики плазмы НИЯУ МИФИ, 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31, Россия  
nkirneva@gmail.com



Андрей Александрович Мартынов, н.с., Ph.D.; Географический институт и Центр изучения изменений климата Ёшгер, Бернский университет, 3012, Берн, Халлер-штрассе, 12, Швейцария  
a.martynov@gmail.com



Юрий Дмитриевич Павлов, с.н.с., четырежды лауреат премии им. И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Россия  
pavlov@nfi.kiae.ru



Владимир Михайлович Трухин, с.н.с., лауреат премий им. И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Россия  
trukhinv@gmail.com



Елена Валентиновна Трухина, ведущий программист; НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Россия  
trukhina@mail.ru

Статья поступила в редакцию 8 октября 2013 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2014, т. 37, вып. 1, с. 56—61.