

УДК 533.9.082

НОВЫЙ ТИП АНАЛИЗАТОРА ЧАСТИЦ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ

Ю.В. Готт¹, А.А. Кадыргулов^{1, 2}

¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва, Россия

Применение эффективных методов корпускулярной диагностики для определения ионной температуры плазмы на современных плазменных установках представляет большой практический интерес. В данной работе предложен новый тип анализатора, в котором ионизация частиц перезарядки происходит при их отражении от металлической поверхности. В качестве ионизатора использована мелкоструктурная никелевая сетка. Приведены экспериментальные результаты применения анализатора на установке Т-10 и выполнена оценка ионной температуры при омическом нагреве плазмы. Показано, что оцененная таким способом ионная температура $T_i = 670$ эВ отличается от рассчитанной по формуле Арцимовича на 10% и от определённой методом активной спектроскопии CXRS примерно на 3%.

Ключевые слова: токамак, диагностика плазмы, Т-10, анализатор атомных частиц, отражательный конвертор.

NEW TYPE OF CHARGE-EXCHANGE PARTICLE ANALYZER FOR THE ION PLASMA TEMPERATURE DETERMINATION

Yu.V. Gott¹, A.A. Kadyrgulov^{1, 2}

¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

²National Research Institute «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia

The application of effective methods of charge-exchange neutral particle diagnostics for determination of the plasma ion temperature on modern plasma installations is of great practical interest. In this paper, a new type of analyzer is proposed, in which ionization of charge-exchange particles occurs when they are reflected from a metallic surface. A fine nickel grid is used as an ionizer. Experimental results of using the analyzer on the T-10 facility are presented and an estimate of the ion plasma temperature in ohmic plasma heating is performed. It is shown that the ion temperature ($T_i = 670$ eV) estimated in this way differs from calculated by the Artsimovich formula by 10% and by a method of active CXRS spectroscopy by approximately 3%.

Key words: tokamak, plasma diagnostics, T-10, atomic particle analyzer, reflective converter.

DOI: 10.21517/0202-3822-2018-41-1-65-69

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших параметров плазмы является её ионная температура. Именно от неё зависит термоядерный выход в будущих энергетических станциях. В лабораторных условиях плазма обычно удерживается магнитным полем, и использовать ионы самой плазмы для анализа характеристик её ионного компонента в этом случае невозможно. В корпускулярной диагностике для этой цели используют быстрые нейтральные частицы (нейтралы), возникающие в результате перезарядки ионов на атомах, которые всегда есть в объёме, занятом плазмой. Эти атомы проникают в плазму из пристеночной области и образуются в самой плазме в результате излучательной электронно-ионной рекомбинации. Измерив энергетический спектр нейтральных частиц, выходящих из плазмы, можно восстановить энергетический спектр её ионов.

Чтобы измерить энергетическое распределение частиц перезарядки, их нужно ионизовать тем или иным способом. В настоящее время ионизация нейтралов осуществляется, в основном, при их столкновениях с атомами мишеней двух типов — газовой и сверхтонкой углеродной фольгой [1]. Кроме этих двух способов, можно использовать и ионизацию при отражении нейтралов от поверхности металлов [2].

Недостатком анализатора с твёрдой мишенью является сама сверхтонкая углеродная фольга. Её сложно изготовить, и к тому же на ней осаждаются примеси, попавшие в анализатор, что требует её регулярной замены.

В настоящей работе предлагается метод определения энергетического распределения в потоке частиц перезарядки, основанный на ионизации нейтральных частиц при их отражении от металлической поверхности.

В работе [2] рассматривалась ионизация атомов водорода с использованием необработанных металлических поверхностей, таких как золото и нержавеющей сталь. Поводом для исследований явился поиск возможных методов детектирования с высокой эффективностью атомов водорода с низкой энергией

(100—3000 эВ). Энергетический спектр ионов, возникших при их рассеянии под углом 10° , имеет форму, схожую со спектром ионов после прохождения газовой мишени. Из-за влияния «грязи» на поверхности мишени нержавеющая сталь и золото дают примерно одинаковые результаты.

Описанный метод имеет недостаток: эффективность такого способа ионизации оказалась на порядок меньше эффективности анализатора с газовой мишенью, а измеренные температуры плазмы отличаются друг от друга почти в 2 раза. Такое отличие объясняется тем, что в работе не учитывалось искажение спектра частиц при их отражении от мишени.

Анализатор с отражательным ионизатором впервые был реализован в аппаратуре для исследования потоков нейтральных частиц в космическом пространстве [3]. В этом приборе нейтральные частицы при отражении от мишени преобразовывались в отрицательные ионы. Результаты показывают, что металлические поверхности могут использоваться для ионизации атомов водорода энергией, превышающей 25 эВ [3].

Для повышения чувствительности метода в настоящей работе предлагается увеличить площадь взаимодействия частиц перезарядки с поверхностью, и с этой целью предлагается использовать рассеяние на стенках ячеек мелкоструктурной никелевой сетки. Схема использования последней, на которой показано, что для ионизации частиц используются боковые стенки ячеек сетки, приведена на рис. 1.

На рис. 2 показана микрофотография сетки толщиной 30 мкм и прозрачностью 90%. Площадь, используемая для ионизации частиц, равна $0,4 \text{ см}^2$ на 1 см^2 сетки.

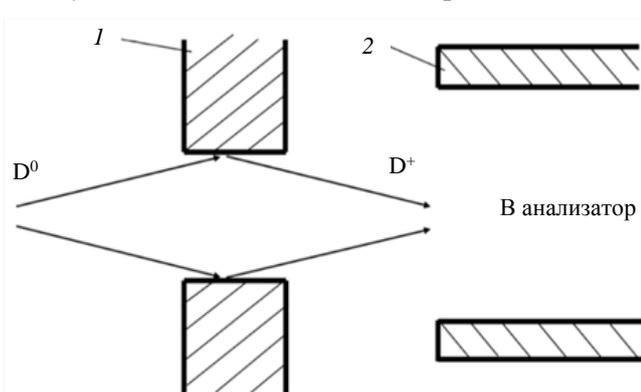


Рис. 1. Схема для ионизации атомов никелевой сеткой: 1 — никелевая сетка (в увеличенном масштабе); 2 — пластины анализатора

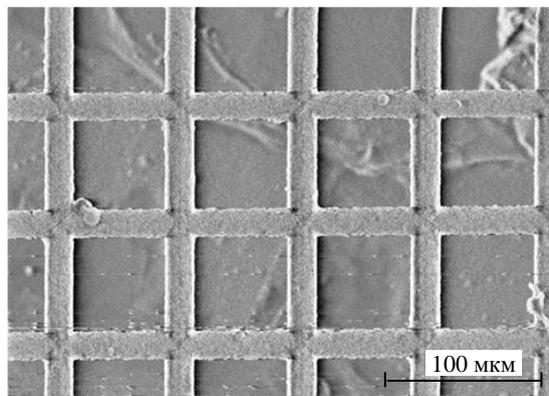


Рис. 2. Микрофотография никелевой сетки

Схема анализатора с сеточным ионизатором (АСИ) представлена на рис. 3. Поток частиц перезарядки из плазмы (D^0) через входной патрубок 5 попадает на мишень-ионизатор 4. Ионы, вышедшие из ионизатора (конвертора), анализируются по энергиям при помощи электростатического анализатора 2 и регистрируются детектором 1. Для защиты анализатора от воздействия рассеянных магнитных полей установки всё устройство помещено в двойной магнитный экран 3, который одновременно является и вакуумным объёмом. На рис. 4 показана фотография внутреннего устройства АСИ, использующегося на установке Т-10.

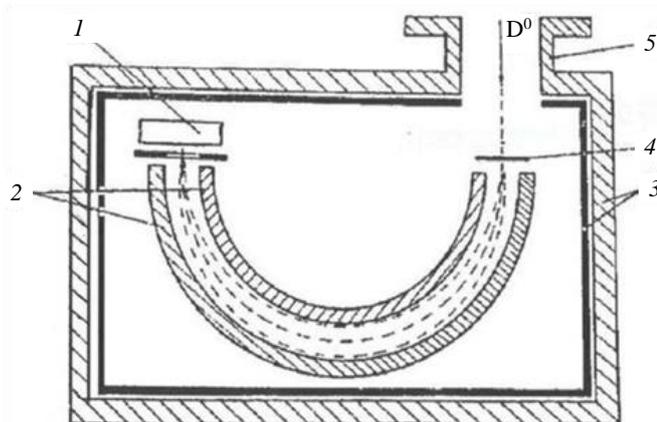


Рис. 3. Анализатор с сетчатым электродом: 1 — детектор; 2 — электростатический анализатор; 3 — магнитные экраны; 4 — ионизатор; 5 — входной патрубок

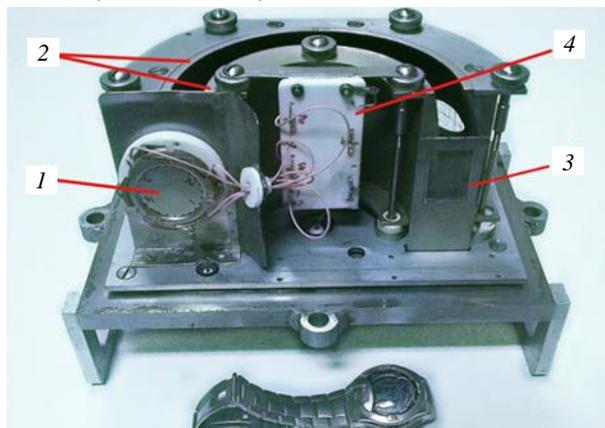


Рис. 4. Фотография внутренней части АСИ установки Т-10: 1 — детектор; 2 — электростатический анализатор; 3 — ионизатор; 4 — делитель, задающий необходимое распределение потенциалов между пластинами в детекторе

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Установка токамак Т-10, на которой проводились эксперименты, имеет следующие основные параметры: большой радиус тора $R = 1,5$ м, малый радиус тора $a = 0,4$ м, величина продольного магнитного поля $B = 2,3$ Тл, плазменный ток $I = 250$ кА, средняя плотность плазмы $\langle n \rangle = 2 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$, длительность импульса $t = 1$ с.

Эксперимент проводился только при омическом нагреве плазмы, рабочим газом служил дейтерий. Изменение тока и плотности плазмы во времени представлено на рис. 5. На рисунке видно, что разряд начинается на 100-й мс, а установившийся режим достигается на 400-й—450-й мс. После каждого импульса все полученные с диагностик данные собираются в общей системе сбора данных.

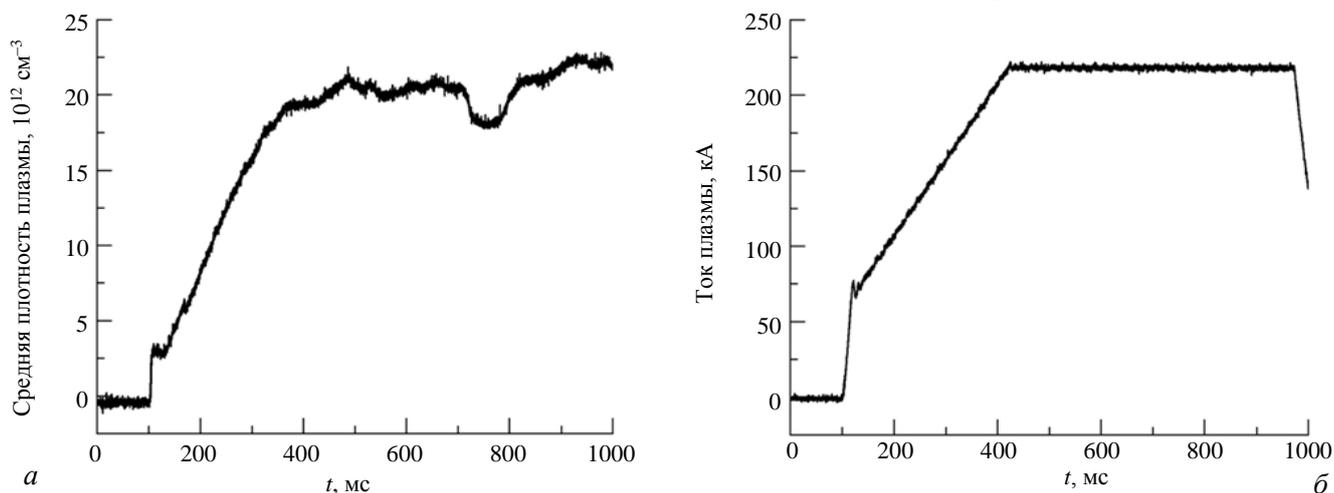


Рис. 5. Изменение средней плотности (а) и тока плазмы (б) во времени на токамаке Т-10

На рис. 6 показаны сигналы, полученные с помощью АСИ. Цифрами 1 и 2 выделены временные промежутки, в которых проводился анализ сигнала (206—221 мс и 510—530 мс).

Как видно, сигнал получился достаточной величины, что позволяет оценить ионную температуру. На рис. 6 по изменению анализирующего напряжения видно, что в данном эксперименте энергетический спектр измеряется каждые 50 мс.

Для восстановления энергетического распределения ионов нужно учесть эффективность регистрации нейтралов анализатором с отражательным конвертором, которая оценочно определяется из соотношения $\eta_{an} \sim E^{0,7}$ [4]. В этом соотношении не учтена эффективность регистрации ионов вторично-электронным умножителем η_s , которая описывается соотношениями

$$\eta_s = \begin{cases} -0,12 + 0,48E_{eqv} & \text{для } 0,4 \leq E_{eqv} \leq 2 \text{ кэВ;} \\ 0,9 - 0,028E_{eqv} & \text{для } 2 < E_{eqv} \leq 10 \text{ кэВ,} \end{cases} \quad (1)$$

где $E_{eqv} = \frac{1}{A_i}(U_s + E)$, U_s — напряжение питания

ВЭУ; A_i — атомный номер ионов плазмы. Потерями энергии частицами при их рассеянии под скользящими углами можно пренебречь.

Энергетический спектр нейтралов, эмитируемых слоем оптически (для нейтралов) тонкой плазмы, в пределах которого такие параметры плазмы, как её температура T_i , плотность n_i и количество атомов n_a , постоянны, может быть представлен в виде

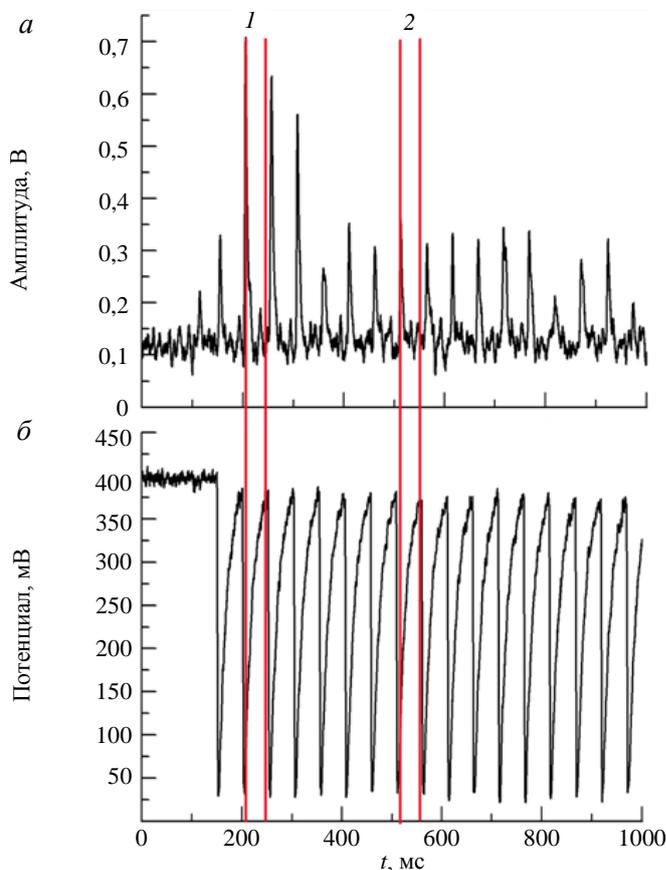


Рис. 6. Изменение сигнала с АСИ (а) и анализирующего напряжения во времени (б) на токамаке Т-10, временные промежутки: 1 — 206—221 мс; 2 — 510—530 мс

$$f_n \sim \sqrt{E} \langle \sigma_{cx} v_i \rangle \exp\left(-\frac{E}{T_i}\right), \quad (2)$$

где σ_{cx} — сечение перезарядки, зависящее от соотношения скоростей сталкивающихся частиц v_i ; T_i — температура ионов;

$$\langle \sigma_{cx} v_i \rangle \sim \frac{(E/A_i)^{0,8}}{1 + 0,001(E/A_i)^2}. \quad (3)$$

Угловые скобки $\langle \rangle$ означают, что соответствующая величина усреднена по функции распределения нейтральных частиц по энергиям.

Зная величину приложенного к обкладкам электростатического анализатора значения потенциала, определяем величину измеряемой энергии E для каждого момента времени в течение времени развёртки t (рис. 7). По амплитуде сигнала $f_n(E)$ с учётом коэффициентов преобразования находим распределение ионов:

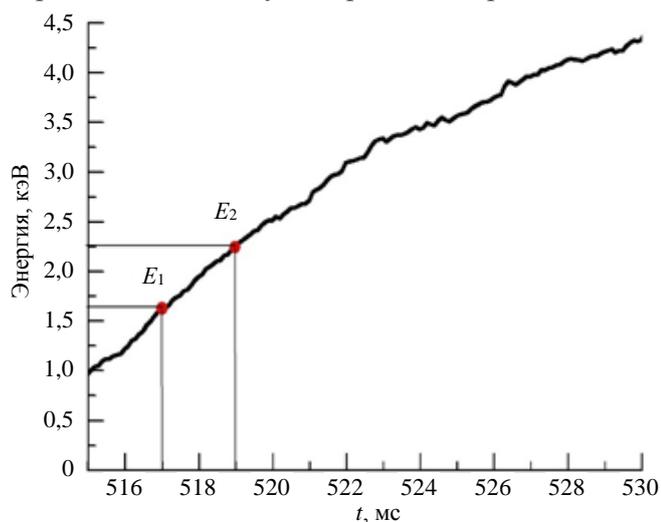


Рис. 7. Спектр измеряемой энергии в интервале 515—530 мс: E_1, E_2 — выбранные значения энергии для оценки температуры

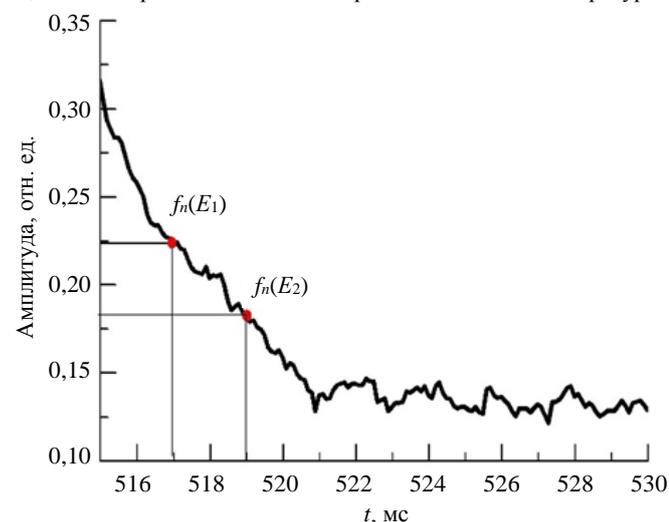


Рис. 8. Выделенный фрагмент сигнала с АСИ в интервале 515—530 мс: $f_n(E_1), f_n(E_2)$ — выбранные значения амплитуды для оценки температуры

ус токамака; $\langle n \rangle$ (10^{13} см^{-3}) — средняя плотность плазмы; A_i — атомная масса рабочего газа.

В работе [6] было показано, что формула Арцимовича с ошибкой, не превышающей $\pm 11\%$, определяет ионную температуру на оси плазмы токамака Т-10, работающего в омическом режиме. Поэтому зависимость $f(E)$ от энергии была уточнена по данным ряда других разрядов.

Для иллюстрации работы АСИ была определена ионная температура плазмы в течение двух временных интервалов — от 206 до 221 мс ($0,5 < E < 4$ кэВ) и от 515 до 530 мс ($1 < E < 4,5$ кэВ) (см. рис. 7, 8). Красными

по амплитуде сигнала $f_n(E)$ с учётом коэффициентов преобразования находим распределение ионов:

$$f_i(E) \sim \frac{f_n(E)}{\sqrt{E} \langle \sigma_{cx} v_i \rangle \eta_{an} \eta_s}. \quad (4)$$

Предполагая, что функция распределения по энергиям ионов максвелловская $f_i = \text{const} \cdot \exp(-E/T_i)$, можно оценить ионную температуру плазмы

$$T_i = \frac{E_1 - E_2}{\ln \frac{f_i(E_2)}{f_i(E_1)}}, \quad (5)$$

где E_1 и E_2 — значения энергии в начале и в конце интервала, на котором измеряется температура (рис. 8).

К сожалению, величины, использованные для получения соотношения $f_i(E)$, известны с недостаточной точностью. Более того, характеристики потока частиц после отражения от поверхности зависят от её физико-химического состояния, которое обычно неизвестно. В связи с этим метод требует дополнительной калибровки.

В 1970 г. Л.А. Арцимович предложил формулу [5], описывающую зависимость ионной температуры в центре меридионального сечения плазмы токамака $T_i(0)$ при омическом нагреве в установившемся режиме от некоторых параметров плазмы и установки:

$$T_i^A = (1,29 \pm 0,11) \frac{(IBR^2 \langle n \rangle)^{1/3}}{\sqrt{A_i}}, \quad (6)$$

где I (кА) — плазменный ток; B (кГс) — тороидальное магнитное поле; R (см) — большой ради-

точками на рисунках отмечены значения энергии и амплитуды сигнала в относительных единицах, которые использовались для оценки температуры плазмы. При обработке результатов измерений энергия анализируемых ионов определялась по потенциалу на обкладках анализатора, по величине сигнала с помощью формулы (4) рассчитывалась функция $f_i(E)$, затем полученные значения подставлялись в формулу (5).

Во временном интервале от 206 до 221 мс, т.е. в то время, когда режим разряда ещё не установился, оценка ионной температуры, проведённая описанным методом, даёт величину $T_e = 0,53$ кэВ. В установившемся режиме работы при номинальных токе и плотности плазмы оценка даёт результат $T_i = 0,67$ кэВ. Как видно, в неустановившемся режиме ионная температура оказывается меньше, чем в установившемся.

Полученные значения температуры необходимо сравнить с значениями, найденными другими методами.

Учитывая известные параметры токамака Т-10, по формуле Арцимовича (6) находим, что температура в установившемся режиме работы равна 0,61 кэВ.

На Т-10 ионную температуру измеряют ещё методом активной спектроскопии CXRS. В этом случае используется излучение в оптическом диапазоне пятизарядных ионов углерода, находящихся в плазме. Предполагается, что температура ионов углерода равна температуре ионов дейтерия. Определённая таким способом ионная температура плазмы оказалась равной 0,65 кэВ.

Как видно, в установившемся режиме плазменного разряда ионная температура, измеренная анализатором с отражательным конвертором, отличается примерно на 3% от температуры, определённой методом CXRS, и на 10% от температуры, рассчитанной по формуле Арцимовича.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была проведена оценка ионной температуры плазмы с помощью нового типа анализатора частиц перезарядки — анализатора с сеточным ионизатором (конвертором).

В качестве ионизатора была использована мелкоструктурная никелевая сетка. Хотя при оценке ионной температуры точных расчётов, учитывающих прозрачность плазмы для частиц данной энергии и радиальные зависимости параметров плазмы, не проводилось, в проведённом первом эксперименте получились результаты, которые показывают, что предложенная модернизация анализатора является перспективной для создания рабочего прибора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Готт Ю.В. Диагностика термоядерных реакторов. Учебное пособие. — М.: Издательский дом МЭИ, 2012. 148 с.
2. Voorhies H.G., Ohkawa T. Use of metallic surfaces to convert hydrogen atoms to ions in the 50—3000 eV energy range. — Plasma Physics (J. of Nuclear Energy, Part C), 1966, vol. 8, p. 555—559.
3. Moore T.E., Chornay D.J., Collier M.R. et al. The low energy neutral atom imager for image. — Space Science Reviews, 2000, vol. 91, p. 155.
4. Готт Ю.В., Курнаев В.А., Вайсберг О.Л. Корпускулярная диагностика лабораторной и космической плазмы. Учебное пособие. Под ред. В.А. Курнаева. — М.: МИФИ, 2008. 144 с.
5. Арцимович Л.А., Глухов А.В., Петров М.П. Энергетический баланс ионов в плазме установок токамак. — Письма в ЖЭТФ, 1970, т. 11, с. 449.
6. Готт Ю.В. О формуле Арцимовича. — Физика плазмы, 2007, т. 33, № 10, с. 958.



Юрий Владимирович Готт, в.н.с., д.ф.-м.н., лауреат премий им. И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Gott_YV@nrcki.ru



Арслан Артурович Кадыргулов, студент (магистр); Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Красноказарменная 17, Москва, Россия; инженер; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
kadyrgulovaa@outlook.com

Статья поступила в редакцию 28 декабря 2017 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 1, с. 65—69.