

04.2

Применение диагностического пучка тяжелых ионов для измерения эволюции радиального электрического поля и потенциала плазмы в токамаке ТУМАН-3М

© А.А. Белокуров, Г.И. Абдуллина, Л.Г. Аскинази, Н.А. Жубр, В.А. Корнев, С.В. Лебедев, Д.В. Разуменко, А.И. Смирнов, А.С. Тукачинский, Д.А. Шергин, Л.К. Шувалова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: belokurov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 13 декабря 2023 г.
В окончательной редакции 28 марта 2024 г.
Принято к публикации 28 марта 2024 г.

В токамаке ТУМАН-3М в сценариях со среднечордовой концентрацией $n > 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ с помощью диагностики пучком тяжелых ионов зарегистрирована эволюция потенциала плазмы при ко-инжекции (по направлению тока плазмы) нейтрального нагревного пучка. Результат показывает, что эффективность нейтральной инжекции с точки зрения генерации вращения зависит от концентрации плазмы. Также в омических разрядах с помощью диагностики пучком тяжелых ионов в двухточечной схеме проведены измерения эволюции радиального электрического поля. Зарегистрировано влияние изменения концентрации на радиальное электрическое поле.

Ключевые слова: физика плазмы, токамак, потенциал плазмы, радиальное электрическое поле, диагностика на основе пучка тяжелых ионов, нейтральная инжекция.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.14.58300.19841

Инжекция высокоэнергичных нейтральных атомов является эффективным методом нагрева плазмы, генерации вращения и доставки топлива в центральную область плазменного шнура. Тороидальное вращение плазмы, генерируемое ионами в плазме, а также потери быстрых ионов могут приводить к сильной локальной эволюции радиального электрического поля [1,2]. Контринжекция (против направления тока плазмы) менее эффективна с точки зрения нагрева и генерации вращения ввиду худшего удержания быстрых ионов в плазме, однако потери быстрых ионов с первой орбиты могут в свою очередь способствовать инициированию перехода в режим улучшенного удержания. На токамаке ТУМАН-3М ранее было исследовано влияние контринжекции на удержание плазмы [3]. Ко-инжекция (по направлению тока плазмы) нейтрального нагревного пучка более эффективна с точки зрения захвата быстрых частиц, однако влияние ко-инжекции на удержание плазмы определяется совместным эффектом от генерации положительного радиального электрического поля E_r (преимущественно в центральной области плазменного шнура) за счет передачи момента от инжектируемого пучка и генерации отрицательного E_r (преимущественно на периферии) за счет потерь быстрых ионов.

Радиальный баланс сил для ионной компоненты плазмы

$$E_r = (Z_i e n_i)^{-1} \frac{\partial p_i}{\partial r} - v_{\theta i} B_\phi + v_{\phi i} B_\theta$$

(Z_i — зарядовое число иона, n_i — концентрация ионов, e — заряд электрона, p_i — давление ионов, B_ϕ , B_θ

и $v_{\phi i}$, $v_{\theta i}$ — тороидальное и полоидальное магнитное поле и скорость вращения соответственно) определяет величину радиального электрического поля в плазме токамака, что было подтверждено экспериментами [4].

Вклад ко-инжекции в генерацию радиального электрического поля можно разделить на две основные части. Первая — влияние вращения плазмы и изменения градиентов концентрации и ионной температуры за счет нагрева плазмы и доставки топлива в центральную часть плазмы; возмущение E_r при этом определяется согласно формуле

$$E_r = \frac{T_i}{e} \left[\frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial r} + k_T \frac{1}{T_i} \frac{\partial T_i}{\partial r} \right] + v_\phi B_\theta,$$

где n — концентрация плазмы, T_i — ионная температура, k_T — неоклассический коэффициент [5], e — заряд электрона, v_ϕ — скорость тороидального вращения плазмы, B_θ — полоидальное магнитное поле; здесь мы учитываем только вращение. Вторая — влияние потерь быстрых частиц, приводящих к появлению радиального тока быстрых ионов j_r^{FI} . Условие сохранения квазинейтральности приводит к возникновению компенсирующего радиального тока $j_r = -j_r^{FI} = \sigma(E_r - E_{NEO})$, где σ — проводимость плазмы, E_r — возмущение радиального электрического поля, E_{NEO} — неоклассическое радиальное электрическое поле, обусловленное градиентом давления. Измеряя эволюцию радиального электрического поля или потенциал плазмы, можно оценить влияние и роль этих вкладов.

Как было показано ранее, в случае с низкой концентрацией плазмы (среднечордовая концентрация плазмы

$n < 1.2 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$) нейтральная инжекция оказывается малоэффективной с точки зрения нагрева плазмы, генерации вращения и инициирования L–H-перехода, так как потери (в первую очередь на пролет) велики [6,7]. Это было заметно по отсутствию эволюции потенциала, измеряемого с помощью диагностики пучком тяжелых ионов (ДПТИ), при нейтральной инжекции, в то время как при ко-инжекции можно ожидать наблюдение как эволюции потенциала в сторону положительных значений относительно величины до начала инжекции, связанной с генерацией вращения плазмы удерживаемыми быстрыми частицами (и возникновением соответствующего возмущения радиального электрического поля), так и эволюции потенциала в сторону отрицательных значений, связанной с потерями быстрых ионов с первой орбиты. Достижение более эффективной передачи энергии и импульса нейтральной инжекции в режиме ко-инжекции представляется возможным в первую очередь за счет увеличения плотности плазмы, так как при этом увеличится доля энергии, передаваемой ионам.

Для измерения эволюции потенциала плазмы использовалась ДПТИ. Комплекс ДПТИ на токамаке ТУМАН-3М позволяет проводить прямое локальное измерение потенциала плазмы, а также радиального электрического поля при использовании двухточечной схемы зондирования [8]. В плазму инжектировался пучок ионов K^+ с энергией 60–70 keV. При такой энергии подбор углов влета позволяет достичь устойчивого попадания вторичного ионного пучка в анализатор энергии в течение большей части разряда. Точка вторичной ионизации и соответственно область измерения при этом отвечают малому радиусу 15 см, или $r/a = 0.7$ (рис. 1, a). Поскольку потенциал плазмы (точнее разность потенциалов между точкой вторичной ионизации и стенкой камеры с радиальными координатами $r_{\text{НИВР}}$ и a соответственно) измеряется с помощью ДПТИ как $\Phi = \int_a^{r_{\text{НИВР}}} E_r dr$, измерение в точке $r/a = 0.7$ позволяет зарегистрировать возмущения, связанные как с генерацией E_r на периферии (потери быстрых ионов), так и в центральной области шнура (генерация вращения, прицельный параметр нейтральной инжекции в токамаке ТУМАН-3М равен 42 см при большом и малом радиусе $R = 53 \text{ cm}$ и $a = 22 \text{ cm}$ соответственно).

Анализатор ДПТИ токамака ТУМАН-3М позволяет работать в режиме двухточечного зондирования, когда через две близко расположенные входные щели в него попадают пучки вторичных ионов из соседних областей плазмы, разнесенных преимущественно в радиальном направлении на 2.5 мм (рис. 1, b). Такое расстояние между объемами вторичной ионизации обеспечивает локальность измерений радиального электрического поля, определяемого через разность потенциалов в соседних точках, так как 1) линейный размер объема вторичной ионизации не превышает 1 мм, а следовательно, области вторичной ионизации не перекрываются; 2) характерная длина изменения радиального электрического поля в

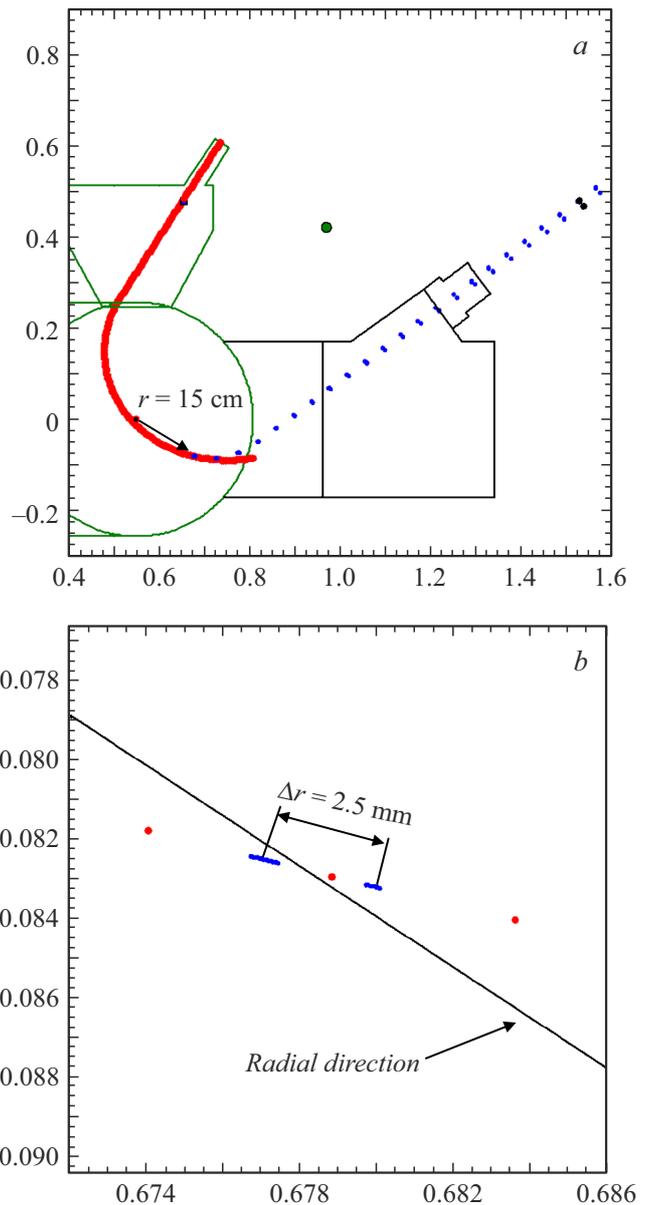


Рис. 1. Схема измерений с помощью ДПТИ в токамаке ТУМАН-3М в полоидальном сечении. *a* — общий вид, *b* — локализация объемов вторичной ионизации.

данной области, определяемая как $L = \frac{E_r}{\nabla E_r}$, для расчетного профиля неоклассического радиального электрического поля (а также профилей E_r , полученных с помощью диагностики обратного доплеровского рассеяния в аналогичных разрядах; см. [9]) составляет 5–6 см, что существенно превышает расстояние между точками вторичной ионизации.

С помощью ДПТИ были проведены измерения в двух сценариях. Сначала рассмотрим сценарий с ко-инжекцией нейтрального нагревного пучка.

В сценариях со среднехордовой концентрацией $n > 2 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ (в момент начала нейтральной инжекции) были проведены измерения эволюции потенциала

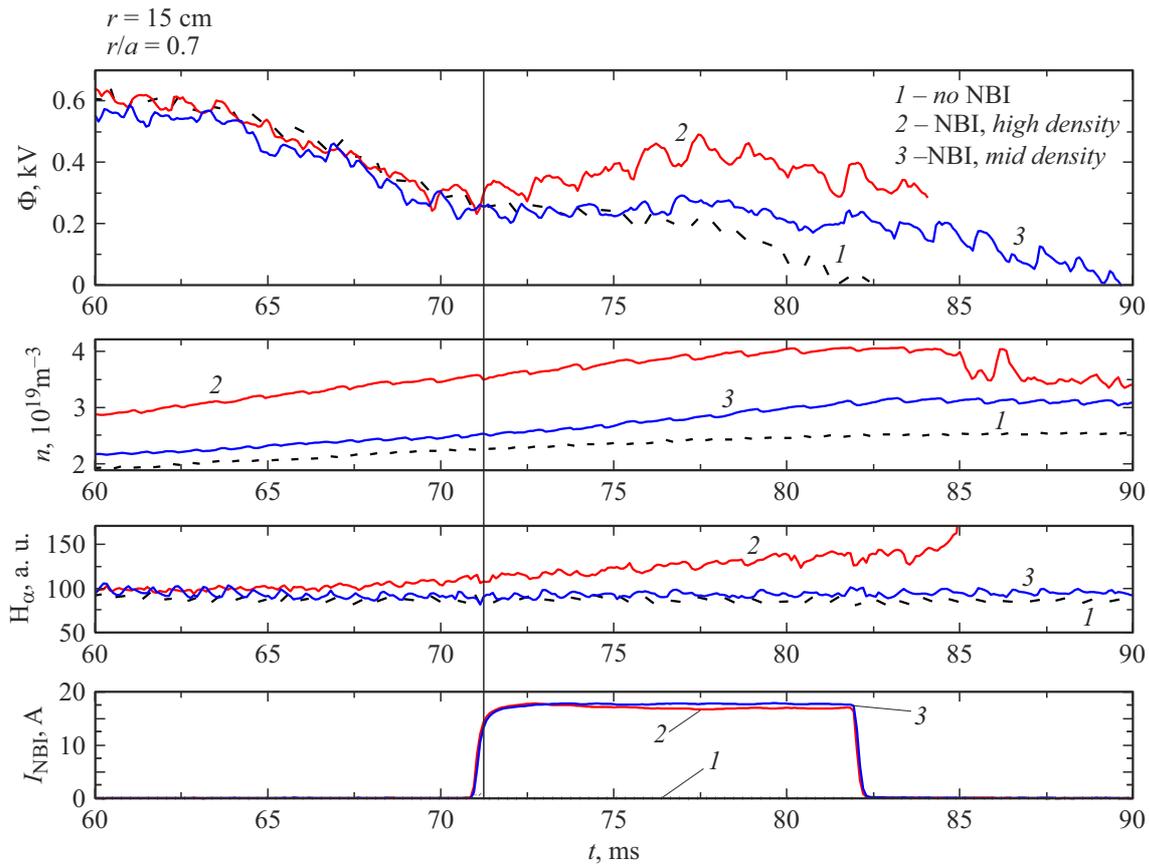


Рис. 2. Эволюция потенциала плазмы, среднечордовой концентрации, свечения линии H_α и тока эмиссионного электрода нейтральной инжекции в разрядах с инжекцией в плазму высокой (красные линии 2) и средней (синие линии 3) концентрации. Черными штриховыми линиями 1 показан реперный разряд без инжекции. В момент инжекции наблюдается эволюция потенциала плазмы в сторону положительных значений. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

плазмы (рис. 2). Пучок нейтральных атомов инжектировался в плазму в разрядах с различной концентрацией; измерения потенциала проводились в центральной области плазменного шнура в точке $r = 15$ см, или $r/a = 0.7$. Поскольку потенциал плазмы, измеряемый тяжелым пучком, определяется как интеграл электрического поля от точки измерения до координаты стенки камеры, такая локализация измерений позволяет почувствовать как периферийные возмущения E_r , связанные с потерями быстрых ионов, так и эффект, связанный с вращением плазмы, вызванным удерживаемыми быстрыми ионами.

Измерения показывают, что при большей концентрации плазмы после нейтральной инжекции происходит эволюция потенциала плазмы в сторону более положительных значений. Это свидетельствует о том, что в плазме появляется дополнительное тороидальное вращение, связанное с быстрыми ионами. В более плотной плазме (красные линии 2 на рис. 2) эффект более выражен, прирост потенциала достигает 300 В. В менее плотной плазме (синие линии 3 на рис. 2) потенциал увеличивается на 100 В. По-видимому, вклад в потенциал, связанный с генерацией вращения плазмы, оказы-

вается доминирующим: существенные потери быстрых ионов приводили бы к эволюции потенциала в сторону отрицательных значений после начала инжекции, так как при этом происходила бы генерация отрицательного радиального электрического поля на периферии плазмы. Также необходимо отметить, что существенные потери быстрых ионов в разрядах с концентрацией $(2-3) \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ приводили бы к инициированию перехода в режим улучшенного удержания [3], чего в исследуемых разрядах не наблюдалось.

Исходя из величины возмущения потенциала можно оценить величину наведенного тороидального вращения плазмы. Для точки измерения потенциала можно оценить вклад в радиальное электрическое поле как $E_r = \Delta\Phi/(a-r)$, что в случае с более высокой концентрацией ($\Delta\Phi = 300 \text{ V}$) дает $E_r \approx 7.5 \text{ kV/m}$, в случае с более низкой концентрацией ($\Delta\Phi = 100 \text{ V}$) $E_r \approx 2.5 \text{ kV/m}$. Скорость наведенного тороидального вращения можно оценить через добавку к E_r как $v_\phi = \frac{E_r B_\theta}{B_\phi^2}$. Для координаты точки измерения $B_r \approx 0.75 \text{ T}$, $B_\theta \approx 0.1 \text{ T}$. Таким образом, для более высокой концентрации прирост к скорости тороидального

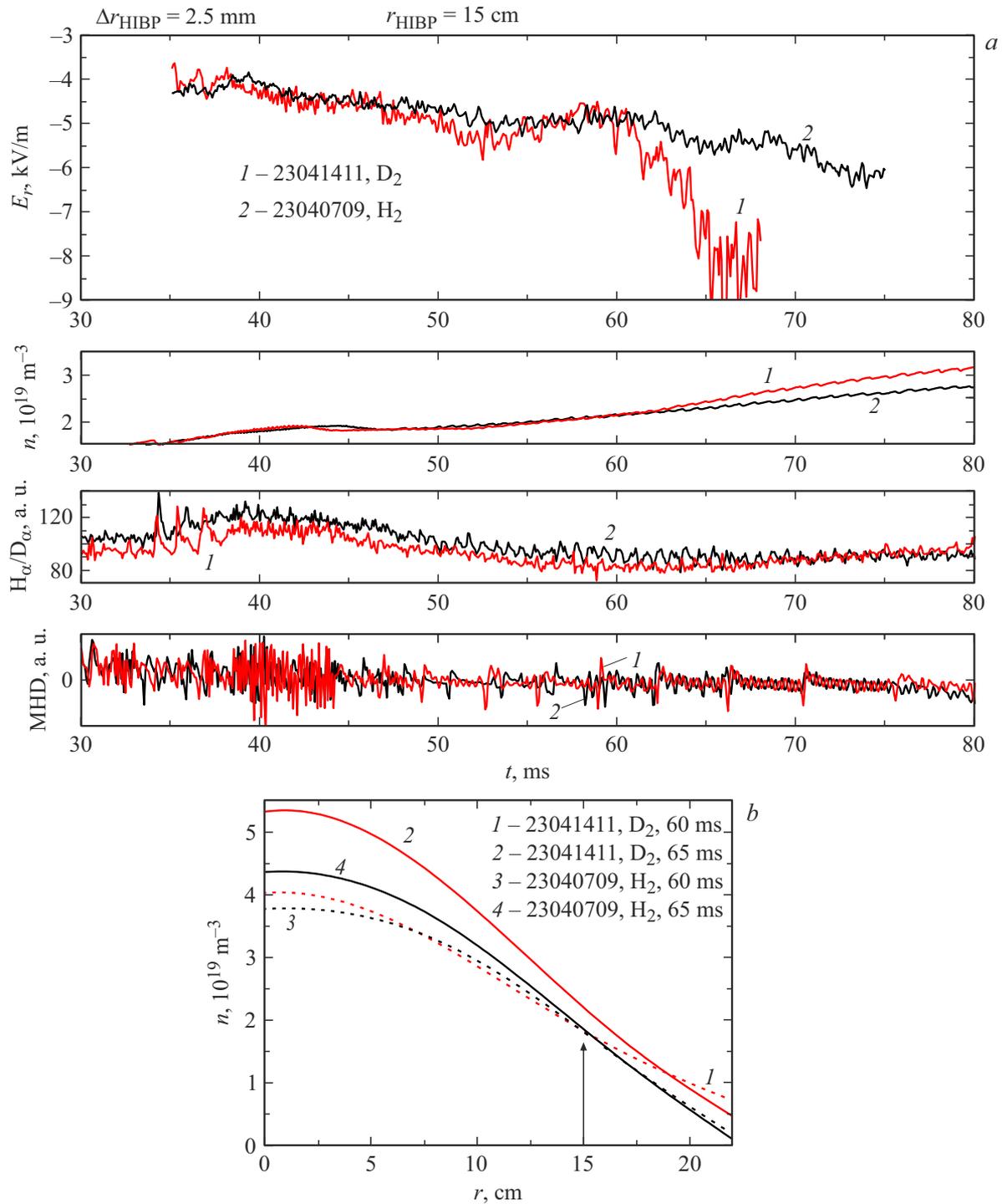


Рис. 3. *a* — эволюция радиального электрического поля, среднечордовой концентрации, свечения линии H_α/D_α и магнито-гидродинамической (МНД) активности в дейтериевом (красные линии 1) и водородном (черные линии 2) разрядах с высокой концентрацией; *b* — эволюция профилей концентрации в исследуемых разрядах. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

вращения за счет ко-инъекции составляет $v_\phi = 1.4 \text{ km/s}$, для более низкой концентрации $v_\phi = 0.45 \text{ km/s}$.

Помимо измерений потенциала в разрядах с нейтральной инжекцией на токамаке ТУМАН-3М с помощью диагностического пучка тяжелых ионов были проведены

прямые измерения радиального электрического поля на радиусе $r = 15 \text{ cm}$ ($r/a = 0.7$) с использованием описанной ранее (рис. 1) двухточечной схемы зондирования. Измерения проводились в омических разрядах в водороде и дейтерии с идентичными параметра-

ми плазмы: тороидальное магнитное поле $B_\phi = 0.96$ Т, ток плазмы $I_{pl} = 150$ кА, среднечордовая концентрация $n = (1.8-3.0) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Расстояние между точками составляет примерно 2.5 мм с преимущественно радиальным разнесением (рис. 1, b).

В омических разрядах токамака ТУМАН-3М в водороде и дейтерии с близкими параметрами плазмы наблюдается схожая эволюция радиального электрического поля (рис. 3, a). Значения E_r , составляющие от -4 до -8 кВ/м, на малом радиусе $r = 15$ см близки к оценкам для локального неоклассического E_r в омическом разряде в стационарной фазе, равного примерно -3 кВ/м. В свою очередь оценка усредненного радиального электрического поля, определяемого как $E_r = \Phi / (a - r_{\text{HВР}})$, для данных разрядов дает величину примерно 2.8 кВ/м. Такие величины радиального электрического поля оказываются близки к значениям, полученным в ходе измерений в омических разрядах с помощью диагностики доплеровского обратного рассеяния [9].

Наблюдаемая в дейтериевом разряде (красная линия 1 на рис. 3, a) эволюция E_r в сторону более отрицательных значений после 60 ms может быть связана с более быстрым ростом концентрации (рис. 3, b), так как в данном омическом разряде в этот момент времени отсутствовали какие-либо иные факторы, воздействующие на E_r , кроме импульсного газонапуска на 60 ms, приводящего к росту концентрации без изменения режима удержания. Вклад в отрицательное E_r в дейтериевом разряде может быть обусловлен как ростом градиента концентрации в области измерения, так и увеличением концентрации как таковой, поскольку меньшая концентрация плазмы способствует генерации более положительных значений E_r и потенциала плазмы [10,11]. В водородном разряде (линии 3, 4 на рис. 3, b) в области измерения E_r как концентрация, так и градиент концентрации изменяются незначительно.

Исследования потенциала плазмы и радиального электрического поля при ко-инжекции нейтрального нагревного пучка показывают, что концентрация плазмы играет определяющую роль с точки зрения эффективности нейтральной инжекции. При увеличении среднечордовой концентрации плазмы до $(2-3) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ во время ко-инжекции проявляется генерация тороидального вращения плазмы. ДПТИ при этом регистрирует положительный прирост потенциала плазмы, что свидетельствует о передаче момента от пучка плазме и достаточно малых потерях быстрых частиц.

С помощью ДПТИ также были проведены первые прямые измерения радиального электрического поля в двухточечной схеме в конфигурации разряда токамака ТУМАН-3М, соответствующей разрядам с ко-инжекцией нейтрального нагревного пучка. Наблюдаемые величины радиального электрического поля в омическом разряде довольно хорошо соответствуют неоклассическим значениям. Влияние концентрации на величину радиального

электрического поля качественно соответствует теоретическим представлениям.

Результаты измерений согласуются с данными, полученными в результате экспериментов с ДПТИ на установках Т-10 [12] (эволюция потенциала в сторону более отрицательных значений при увеличении концентрации плазмы) и ТУ-И [13] (эволюция потенциала в сторону более отрицательных значений при нейтральной инжекции). Необходимо отметить, что в экспериментах на установках Т-10 и ТУ-И также наблюдалась эволюция потенциала в сторону более положительных значений при ЭЦР-нагреве (ЭЦР — электронный циклотронный резонанс), что мотивирует дальнейшие исследования.

Финансирование работы

Работа стандартных диагностик токамака ТУМАН-3М осуществляется при поддержке госконтракта ФТИ им. А.Ф. Иоффе FFUG-2024-0028. Эксперименты с нейтральной инжекцией осуществлены при поддержке госконтракта ФТИ им. А.Ф. Иоффе 0034-2021-0001. Исследования с помощью ДПТИ на токамаке ТУМАН-3М обеспечиваются РНФ (проект 22-12-00062).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] K. Ida, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **40**, 1429 (1998). DOI: 10.1088/0741-3335/40/8/002
- [2] G.D. Conway, J. Schirmer, S. Kluge, W. Suttrop, E. Holzhauser and the ASDEX Upgrade Team, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **46**, 951 (2004). DOI: 10.1088/0741-3335/46/6/003
- [3] S.V. Lebedev, L.G. Askinazi, F.V. Chernyshev, M.A. Irzak, V.A. Kornev, S.V. Krikunov, A.D. Melnik, D.V. Razumenko, V.V. Rozhdestvensky, A.I. Smirnov, *Nucl. Fusion*, **49**, 085029 (2009). DOI: 10.1088/0029-5515/49/8/085029
- [4] P. Gohil, K.H. Burrell, T.N. Carlstrom, *Nucl. Fusion*, **38**, 93 (1998). DOI: 10.1088/0029-5515/38/1/308
- [5] V.A. Rozhansky, S.P. Voskoboinikov, A.Yu. Popov, *Plasma Phys. Rep.*, **27**, 205 (2001). DOI: 10.1134/1.1354218
- [6] А.А. Белокуров, Г.И. Абдуллина, Л.Г. Аскинази, Н.А. Жубр, В.А. Корнев, С.В. Лебедев, Д.В. Разуменко, А.И. Смирнов, А.С. Тукачинский, Д.А. Шергин, Письма в ЖТФ, **48** (24), 33 (2022). DOI: 10.21883/PJTf.2022.24.54022.19380 [A.A. Belokurov, G.I. Abdullina, L.G. Askinazi, N.A. Zhubr, V.A. Kornev, S.V. Lebedev, D.V. Razumenko, A.I. Smirnov, A.S. Tukachinskiy, D.A. Shergin, *Tech. Phys. Lett.*, **48** (12), 69 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.12.54953.19380].
- [7] V.A. Kornev, L.G. Askinazi, F.V. Chernyshev, V.E. Golant, S.V. Krikunov, S.V. Lebedev, A.D. Melnik, D.V. Razumenko, V.V. Rozhdestvensky, A.S. Tukachinskiy, M.I. Vildjunas, N.A. Zhubr, in *Proc. of 35th EPS Conf. on plasma physics* (Hersonissos, 2008), P2.103. https://www.researchgate.net/publication/237261442_Analysis

_of_density_dependence_of_neutron_rate_in_NBI
_experiments_on_TUMAN-3M

- [8] L. Askinazi, G. Abdullina, A. Belokurov, V. Kornev, S. Lebedev, D. Razumenko, D. Shergin, A. Smirnov, A. Tukachinsky, N. Zhubr, *Atoms*, **10**, 152 (2022). DOI: 10.3390/atoms10040152
- [9] A.Yu. Yashin, A.A. Belokurov, L.G. Askinazi, A.V. Petrov, A.V. Ponomarenko, *Atoms*, **10**, 106 (2022). DOI: 10.3390/atoms10040106
- [10] В.И. Бугаря, А.В. Горшков, С.А. Грашин, И.В. Иванов, В.А. Крупин, Л.И. Крупник, И.С. Недзельский, А.В. Мельников, К.А. Разумова, Ю.А. Соколов, В.М. Трухин, *Письма в ЖЭТФ*, **38** (7), 337 (1983). [V.I. Bugarya, A.V. Gorshkov, S.A. Grashin, I.V. Ivanov, A.A. Krupin, L.I. Krupnik, I.S. Nedzel'skij, A.V. Mel'nikov, K.A. Razumova, Yu.A. Sokolov, V.M. Trukhin, *JETP Lett.*, **38** (7), 404 (1983)].
- [11] V.I. Bugarya, A.V. Gorshkov, S.A. Grashin, I.V. Ivanov, V.A. Krupin, A.V. Mel'nikov, K.A. Razumova, Yu.A. Sokolov, V.M. Trukhin, A.V. Chankin, P.N. Yushmanov, L.I. Krupnik, I.S. Nedzel'skij, *Nucl. Fusion*, **25**, 1707 (1985). DOI: 10.1088/0029-5515/25/12/001
- [12] A.V. Melnikov, L.G. Eliseev, S.V. Perfilov, V.F. Andreev, S.A. Grashin, K.S. Dyabilin, A.N. Chudnovskiy, M.Yu. Isaev, S.E. Lysenko, V.A. Mavrin, M.I. Mikhailov, D.V. Ryzhakov, R.V. Shurygin, V.N. Zenin, *Nucl. Fusion*, **53**, 093019 (2013). DOI: 10.1088/0029-5515/53/9/093019
- [13] A.V. Melnikov, L. Krupnik, E. Ascasibar, A. Cappa, A. Chmyga, G.N. Deshko, M. Drabinskij, L.E. Eliseev, C. Hidalgo, P. Khabanov, S.M. Khrebtov, N. Kharchev, A. Komarov, A.S. Kozachek, S.E. Lysenko, A. Molinero, J.L. Pablos, M.V. Ufimtsev, V.N. Zenin, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **60**, 084008 (2018). DOI: 10.1088/1361-6587/aac97f