

04.2

Эволюция потенциала плазмы в токамаке ТУМАН-3М при инжекции криогенной топливной макрочастицы

© 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 6 июня 2024 г.
В окончательной редакции 12 июля 2024 г.
Принято к публикации 12 июля 2024 г.

В токамаке ТУМАН-3М проведена серия экспериментов с инжекцией криогенной топливной макрочастицы (пеллеты). В рамках экспериментов исследована эволюция потенциала плазмы центральной и периферийной областей плазменного шнура с помощью диагностического пучка тяжелых ионов и ленгмюровских зондов. Обе диагностики регистрируют эволюцию потенциала в сторону отрицательных значений при испарении пеллеты. Измерения показывают, что испарение твердой пеллеты в текущей конфигурации эксперимента может приводить к кратковременному (до нескольких миллисекунд) улучшению удержания плазмы.

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

DOI: 10.61011/PJTF.2024.21.58961.20015

Инжекция макрочастиц (пеллет) в плазму токамака — один из методов управления удержанием плазмы. Топливные криогенные пеллеты позволяют эффективно доставлять большое количество частиц в центральную область плазменного шнура. Как топливные, так и примесные пеллеты при испарении на периферии способны формировать область с сильными градиентами электронного и ионного давления, что напрямую влияет на удержание плазмы. Примесные пеллеты способны вызывать контролируемые возмущения на периферии плазменного шнура и за счет излучения выводить излишек энергии при вероятности срыва плазменного разряда.

Первые эксперименты, в которых наблюдалось влияние пеллеты на удержание плазмы и инициирование перехода в Н-моду (режим улучшенного удержания), были проведены на токамаке ТУМАН-3М в 1993 г. [1]. В этих экспериментах использовалась примесная (LiD) пеллета, инжектированная в радиальном направлении. Улучшение удержания при инжекции пеллеты также наблюдалось на токамаке T-10 [2]. На токамаке DIII-D в экспериментах с пеллет-инжекцией было обнаружено снижение пороговой мощности нагрева, необходимой для перехода в Н-моду [3]. В результате инжекции дейтериевых пеллет в токамаках MAST и EAST наблюдался переход в Н-моду [4,5] при совместном использовании пеллеты и дополнительного нагрева плазмы.

Испарение пеллеты в плазме и последующая ионизация испарившегося вещества приводят к локальному возмущению источника частиц, локальному охлаждению ионного компонента плазмы за счет разбавления тепловых ионов более холодными ионами из вещества макрочастицы, локальному увеличению стока ионного тепла

через канал перезарядки и электронного тепла через канал ионизации; также электронное тепло расходуется на излучение и нагрев испаряемого с поверхности пеллеты вещества. Таким образом, испарение пеллеты приводит к локальному возмущению градиентов концентрации, ионной и электронной температуры и, как следствие, к возмущению радиального электрического поля и потенциала плазмы, которое можно определить согласно неоклассической теории [6]:

$$E_r = \frac{T_i}{e} \left[\frac{\partial \ln n}{\partial r} + k_T \frac{\partial \ln T_i}{\partial r} \right],$$

где n — концентрация плазмы, T_i — ионная температура, e — заряд электрона, k_T — неоклассический коэффициент.

Возникновение сильно неоднородного радиального электрического поля E_r с большой величиной неоднородности — так называемым широм

$$\omega_{ExB} = \left| \frac{RB_\theta}{B_T} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{E_r}{RB_\theta} \right) \right|$$

(где B_θ и B_T — полоидальное и тороидальное магнитные поля, R — большой радиус плазмы) — способствует подавлению турбулентности и инициированию перехода плазмы в Н-моду [7]. Этот механизм, а также влияние источника частиц, связанного с пеллетой, и влияние испарения пеллеты на развитие турбулентности были проанализированы в рамках предыдущих экспериментов [8] при помощи численного моделирования с использованием транспортной модели [8,9] и гирокинетического кода [10].

В настоящей работе представлены результаты прямых измерений эволюции потенциала плазмы в центральной и периферийной областях плазмы в разрядах с инъекцией пеллеты. Измерения проводились с помощью ленгмюровских зондов и — впервые на токамаке ТУМАН-3М — с помощью диагностического пучка тяжелых ионов (ДПТИ); принципы работы диагностики и особенности диагностического комплекса на токамаке ТУМАН-3М описаны в [11]. Проведенные измерения позволяют осуществить сопоставление с результатами, полученными в ходе численного моделирования более ранних экспериментальных сценариев [8–10].

В настоящий момент на токамаке ТУМАН-3М ($R = 0.55$ m, $a = 0.22$ m, $B_T < 1$ T, $I_p < 180$ kA) установлен пневматический инжектор производства фирмы ПЕЛИН [12], который позволяет запустить в плазму до четырех замороженных топливных пеллет диаметром от 0.6 до 1.0 mm. В качестве ускоряющего газа используется гелий. От инжектора пеллета пролетает по пеллетопроводу длиной 6.3 m через системы дифференциальной откачки. Это позволяет минимизировать попадание ускоряющего газа в плазму. Схема эксперимента представлена на рис. 1. Инжекция проводится в тангенциальном направлении через патрубок нейтральной инжекции, прицельный параметр пеллет-инжекции равняется 54 см; в экваториальной проекции угол между осью нейтрального нагревного пучка и траекторией инжекции пеллеты составляет 13° , траектории пересекаются в центре входного патрубка нейтральной инжекции. Такая конфигурация при скоростях пеллеты от 200 до 600 m/s позволяет сосредоточить испарение в периферийной области ($r/a > 0.4$). Скорость пеллеты задается косвенно посредством установки давления ускоряющего газа (с точностью примерно ± 50 m/s) и определяется по задержке между срабатыванием пары световых барьеров в инжекторе при пролете пеллеты [12].

Для наблюдения испарения пеллеты в плазме использован оптический датчик свечения линии H_α/D_α , диаграмма направленности датчика ориентирована вдоль траектории пеллеты (рис. 1). По ярко выраженному пику на сигнале указанного оптического датчика (так называемой кривой испарения пеллеты) возможно определить момент влета и время испарения пеллеты в плазме. В разрядах можно видеть классическую форму кривой испарения [13], характеризующуюся быстрым ростом в течение 0.2–0.5 ms и еще более быстрым спадом, — такая кривая испарения наблюдается при влете твердой макрочастицы в плазму. Зная геометрию инжекции, скорость пеллеты и геометрию наблюдения свечения испаряющегося вещества пеллеты, по форме кривой испарения можно определить глубину проникновения пеллеты в плазму.

На рис. 2, *a, b* и 3 приведены примеры эволюции параметров разрядов в токамаке ТУМАН-3М с инъекцией пеллеты. В разрядах на рис. 2, *a* и *b* эволюция потенциала плазмы, локальной электронной концентрации и температуры на периферии (в тени диафрагмы

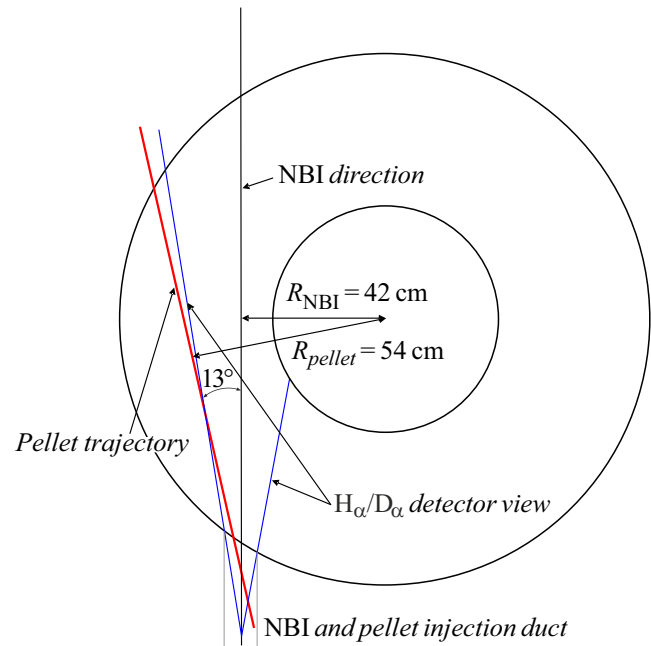


Рис. 1. Схема эксперимента по инъекции пеллеты в токамаке ТУМАН-3М в экваториальной плоскости. Обозначены траектория пеллеты, направление нейтральной инжекции (NBI) и угол обзора датчиков свечения H_α/D_α , „наблюдающих“ за испарением пеллеты. Также указаны прицельные параметры нейтральной инжекции ($R_{NBI} = 42$ cm) и пеллет-инжекции ($R_{pellet} = 54$ cm).

в непосредственной близости от последней замкнутой магнитной поверхности) исследовалась с помощью ленгмюровского зонда. В разряде на рис. 3 эволюция потенциала плазмы исследовалась с помощью ДПТИ на малом радиусе $r/a = 0.7$.

В разряде 24040908 (рис. 2, *a*) пеллета с исходным диаметром 0.7 mm влетела в плазму на 68.3 ms со скоростью около 480 m/s и полностью испарилась на относительном малом радиусе $r/a = 0.74$. В разряде 24041711 (рис. 2, *b*) пеллета с исходным диаметром 0.6 mm влетела в плазму на 60.2 ms со скоростью около 400 m/s и полностью испарилась на $r/a = 0.71$. В разряде 24041716 (рис. 3) в плазму влетела пеллета на 63 ms. Скорость пеллеты составила около 300 m/s, исходный диаметр 0.8 mm, глубина проникновения — до малого радиуса $r/a = 0.77$. Размеры и скорость пеллет определялись таким образом, чтобы испарение было сосредоточено на периферии плазмы и по возможности не приводило к срыву разряда.

Эволюцию параметров плазмы при инъекции пеллеты можно условно разбить на три фазы (рис. 2, *a, b* и 3).

Фаза I представляет собой невозмущенную омическую плазму до момента влета пеллеты со среднечордовой концентрацией на центральной хорде интерферометра $(1.2–1.5) \cdot 10^{19}$ m⁻³.

Фаза II соответствует испарению пеллеты и модификации профилей и параметров плазмы. В этой фазе

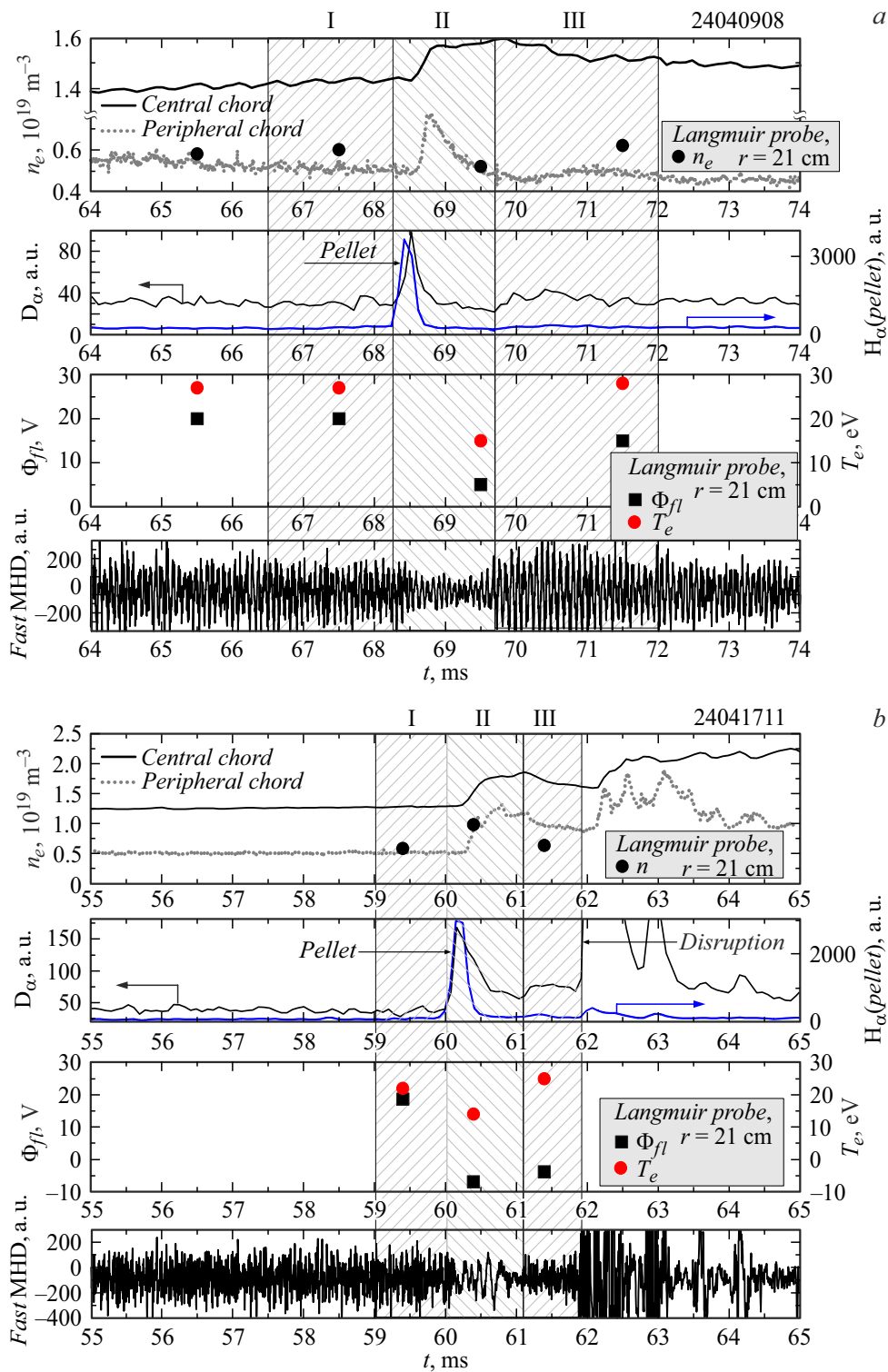


Рис. 2. Инжекция замороженной макрочастицы в токамак ТУМАН-3М. *a* — измерения в разряде с кратковременным улучшением удержания. *b* — измерения в разряде без улучшения удержания. Сверху вниз: среднехордовая концентрация плазмы и локальная концентрация плазмы на периферии, измеренная с помощью ленгмюровских зондов; свечение линии D_α на периферии (левая ось) и сигнал оптического датчика, „смотрящего“ вдоль траектории пеллеты (правая ось); плавающий потенциал и электронная температура плазмы на периферии, измеренные с помощью ленгмюровских зондов; сигнал высокочастотных МГД-зондов.

происходит резкий рост среднехордовой концентрации, измеренной по центральной хорде, после испарения

пеллеты; в процессе испарения на сигналах датчиков свечения H_α/D_α наблюдается пик. Увеличенная концен-

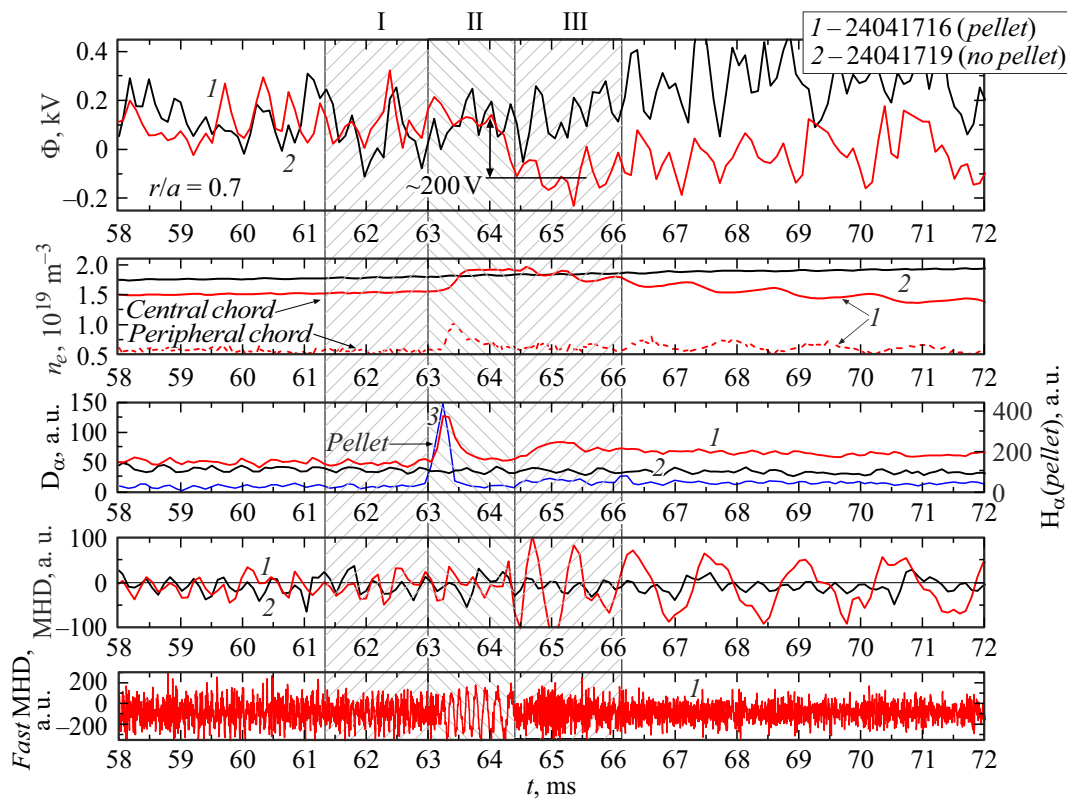


Рис. 3. Эволюция потенциала плазмы, измеренная с помощью ДПТИ, в разряде с инъекцией пеллеты (красные линии 1) и аналогичном разряде без пеллеты (черные линии 2). Сверху вниз: потенциал плазмы в точке 15 см ($r/a = 0.7$); среднехордовая концентрация плазмы; свечение линии D_α на периферии и сигнал оптического датчика, „смотрящего“ вдоль траектории пеллеты (синие линии 3); сигнал низкочастотных МГД-зондов; сигнал высокочастотных МГД-зондов. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

трация поддерживается на пиковом уровне в течение 2–3 ms и сопровождается одновременным спадом свечения линии H_α/D_α на периферии после испарения пеллеты. Локальная концентрация на срезе диафрагмы в одном случае падает (рис. 2, *a*), в другом — возрастает (рис. 2, *b*) относительно значения в фазе I. Аналогичная эволюция наблюдается для среднехордовой концентрации на периферийной хорде. Измерения с помощью ленгмюровского зонда показывают спад плавающего потенциала плазмы и электронной температуры в тени диафрагмы (рис. 2, *a* и *b*). Измерения с помощью ДПТИ также показывают спад потенциала плазмы после испарения пеллеты (рис. 3). Сигнал быстрых магнитных зондов демонстрирует спад высокочастотной части спектра магнитогидродинамических (МГД) колебаний.

Фаза III соответствует состоянию плазмы после термализации и распределения в плазме вещества пеллеты. Происходит спад среднехордовой концентрации на центральной хорде, возрастают до прежних (соответствующих фазе I) значений плавающий потенциал плазмы и электронная температура в тени диафрагмы, а также интенсивность высокочастотных колебаний на быстрых МГД-зондах. Сигнал свечения линии D_α на периферии возрастает до величины, превышающей значения в

фазе II. В фазе III также может происходить усиление МГД-активности с образованием крупного магнитного острова и деградацией удержания с сильной модуляцией потенциала плазмы и концентрации с частотой МГД-колебаний (рис. 3) или срыв разряда (рис. 2, *b*).

Поведение параметров плазмы на рис. 2, *a* и 3 может свидетельствовать о том, что испарение пеллеты привело к кратковременному (длительностью несколько миллисекунд) улучшению удержания, характеризующемуся образованием транспортного барьера на периферии. Признаками формирования периферийного транспортного барьера являются: 1) спад локальной концентрации на периферии (снаружи от барьера) при одновременном росте среднехордовой концентрации плазмы; 2) спад свечения линии D_α на периферии; 3) спад интенсивности высокочастотных флуктуаций, в том числе и фиксируемых быстрыми магнитными зондами (что регулярно наблюдается при L–H-переходе на токамаке ТУМАН-3М). Формирование транспортного барьера сопровождается генерацией периферийного отрицательного E_r , что также выражается в эволюции потенциала плазмы в сторону отрицательных значений. Спад локальной электронной температуры на границе плазмы при одновременном росте T_e в центре также может сви-

детельствовать о формировании транспортного барьера на температуре; обычно транспортный барьер на T_e в токамаке ТУМАН-3М располагается глубже в плазме, чем на концентрации [14].

Измерение с помощью ДПТИ (рис. 3) показывает, что потенциал спадает относительно реперного разряда на величину около 200 V. Это позволяет оценить изменение радиального электрического поля как $E_r = \Delta\Phi/(a - r)$, что соответствует примерно 3 kV/m. Оценка превосходит значения, полученные в ходе моделирования в работах [8,10]. Это наблюдение требует более тщательного изучения и проведения прямых измерений E_r в области испарения пеллеты.

Уменьшение локальной концентрации на периферии плазмы в разрядах 24040908 (рис. 2, *a*) и 24041716 (рис. 3) может служить основанием для того, чтобы связывать наблюдаемое явление именно с модификацией режима удержания, а не только с влиянием локально изменяющихся градиентов концентрации и температуры на электрическое поле

$$E_r = \frac{T_i}{e} \left[\frac{\partial \ln n}{\partial r} + k_T \frac{\partial \ln T_i}{\partial r} \right].$$

Примером испарения пеллеты, не приводящим к кратковременному улучшению удержания, можно считать сценарий, приведенный на рис. 2, *b*. Несмотря на то что в этом сценарии потенциал и электронная температура спадают, концентрация плазмы на периферии (т.е. снаружи от транспортного барьера) возрастает после испарения пеллеты (в противоположность сценарию, представленному на рис. 2, *a*). Также здесь не наблюдается спад свечения линии H_α/D_α на периферии. Спад потенциала плазмы и электронной температуры без улучшения удержания можно объяснить как следствие локального охлаждения плазмы и локального возмущения источника частиц и тепла, что может приводить к возмущению профилей с образованием укрученных градиентов концентрации и температуры, как это было показано в работе [8]. Уменьшение уровня флуктуаций, которое также наблюдается в данном сценарии, может быть связано не с подавлением турбулентности за счет шира вращения плазмы, а с существенным изменением столкновительности плазмы в области испарения пеллеты, обусловленным быстрым локальным охлаждением и увеличением концентрации плазмы при испарении пеллеты. Это приводит к тому, что до термализации вещества пеллеты в данной области не выполняются условия раскочки турбулентности, как это было продемонстрировано в работе [10].

В токамаке ТУМАН-3М были проведены эксперименты с пеллет-инжекцией, в которых впервые эволюция потенциала плазмы при испарении пеллеты была измерена с помощью ДПТИ. Испарение пеллеты приводит к изменению потенциала в сторону более отрицательных значений и подавлению флуктуаций, однако последнее может быть связано как с кратковременным улучшением

удержания плазмы, так и с временным прекращением выполнения условий раскочки основной турбулентной моды из-за локального охлаждения и роста столкновительности.

Можно предположить, что для достижения самоподдерживающегося перехода в режим улучшенного удержания необходимо увеличить фоновую концентрацию плазмы, так как в текущей конфигурации величина источника частиц не обеспечивает существования стационарной H-моды [8,9]. Также необходимо использование более мелких пеллет, не приводящих к срыву плазмы. Это позволит использовать пеллет-инжекцию в сценариях с более высокой концентрацией плазмы, а также в сценариях с совместной инжекцией нейтральных атомов и пеллеты, в которых существует возможность добиться устойчивого перехода в H-моду, инициированного испарением пеллеты [8].

Финансирование работы

Работа стандартных диагностик токамака ТУМАН-3М осуществляется при поддержке госконтракта ФТИ им. А.Ф. Иоффе FFUG-2024-0028. Эксперименты с инжекцией макрочастицы осуществлены при поддержке госконтракта ФТИ им. А.Ф. Иоффе 0034-2021-0001. Измерения потенциала плазмы в токамаке ТУМАН-3М обеспечиваются РНФ (проект 22-12-00062).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] L.G. Askinazi, V.E. Golant, S.V. Lebedev, L.S. Levin, V.A. Rozhansky, M. Tendler, Phys. Fluids B, **5**, 2420 (1993). DOI: 10.1063/1.860726
- [2] В.Г. Капралов, В.А. Рожанский, К.В. Хлопенков, Письма в ЖТФ, **21** (6), 57 (1995).
- [3] P. Gohil, L.R. Baylor, T.C. Jernigan, K.H. Burrell, T.N. Carlstrom, Phys. Rev. Lett., **86**, 644 (2001). DOI: 10.1103/PhysRevLett.86.644
- [4] M. Valovič, L. Garzotti, C. Gurl, R. Akers, J. Harrison, C. Michael, G. Naylor, R. Scannell and the MAST Team, Nucl. Fusion, **52**, 114022 (2012). DOI: 10.1088/0029-5515/52/11/114022
- [5] X.J. Yao, J.S. Hu, Y. Chen, Z. Sun, H.Q. Liu, H. Lian, S.X. Wang, Y.X. Jie, N. Shi, G.S. Xu, Q.Q. Yang, T.H. Shi, C. Zhou, Z. Xu, X. Zhu, T.F. Wang, Q. Zang, Y. Yuan, C.Z. Li, X.W. Zhen, X.Z. Gong, J. Li, G.J. Wu, X.L. Yuan and the EAST Team, Nucl. Fusion, **57**, 066002 (2017). DOI: 10.1088/1741-4326/aa665c
- [6] S.P. Hirshman, D.J. Sigmar, Nucl. Fusion, **21**, 1079 (1981). DOI: 10.1088/0029-5515/21/9/003
- [7] H. Biglari, P.H. Diamond, P.W. Terry, Phys. Fluids B, **2**, 1 (1990). DOI: 10.1063/1.859529

- [8] A.A. Belokurov, L.G. Askinazi, L. Chôné, E.Z. Gusakov, T.P. Kiviniemi, V.A. Kornev, T. Korpilo, S.V. Krikunov, S.V. Lebedev, S. Leerink, P. Niskala, R. Rochford, A.I. Smirnov, A.S. Tukachinsky, N.A. Zhubr, *Nucl. Fusion*, **58**, 112007 (2018). DOI: 10.1088/1741-4326/aac4e9
- [9] A.A. Belokurov, G.I. Abdullina, L.G. Askinazi, V.V. Bulanin, L. Chôné, A.D. Gurchenko, E.Z. Gusakov, T.P. Kiviniemi, V.A. Kornev, S.V. Krikunov, D.V. Koupprienko, S.I. Lashkul, S.V. Lebedev, S. Leerink, P. Niskala, A.V. Petrov, D.V. Razumenko, A.S. Tukachinsky, A.Yu. Yashin, N.A. Zhubr, *Phys. Scripta*, **95**, 115604 (2020). DOI: 10.1088/1402-4896/abbfcc
- [10] T.P. Kiviniemi, P. Niskala, L.G. Askinazi, A.A. Belokurov, L. Chôné, A.D. Gurchenko, E.Z. Gusakov, T. Korpilo, S.V. Lebedev, S. Leerink, R. Rochford, A.S. Tukachinsky, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **60**, 085010 (2018). DOI: 10.1088/1361-6587/aac917
- [11] 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
- [12] И.В. Виняр, А.П. Умов, А.Я. Лукин, П.В. Резниченко, ПТЭ, № 5, 133 (2006). [I.V. Vinyar, A.P. Umov, A.Ya. Lukin, P.V. Reznichenko, *Instrum. Exp. Tech.*, **49** (5), 717 (2006). DOI: 10.1134/S0020441206050204].
- [13] G. Pegourie, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **49**, R87 (2007). DOI: 10.1088/0741-3335/49/8/R01
- [14] L.G. Askinazi, V.V. Bulanin, M.I. Vildjunas, V.E. Golant, M.V. Gorokhov, V.A. Kornev, S.V. Krikunov, S.V. Lebedev, A.V. Petrov, V.V. Rozhdestvensky, A.S. Tukachinsky, N.A. Zhubr, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **46**, A51 (2004). DOI: 10.1088/0741-3335/46/5A/005