

04

Наблюдение тороидального вращения плазмы при инжекции высокоэнергичного атомарного пучка и L–H-переходе в токамаке ТУМАН-3М

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

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

Поступило в Редакцию 10 октября 2024 г.

В окончательной редакции 12 ноября 2024 г.

Принято к публикации 20 ноября 2024 г.

Проведены измерения скорости тороидального вращения в периферийной плазме токамака ТУМАН-3М при инжекции атомарного высокоэнергичного пучка в направлении по току плазмы и в режиме омической H-моды. Обнаружено, что временная эволюция и установившаяся скорость тороидального вращения на периферии, направленная навстречу направлению инжекции и току плазмы, одинаковы в обоих сценариях. Наблюдаемое тороидальное вращение связано с генерацией на периферии отрицательного (направленного к центру плазмы) радиального электрического поля при L–H-переходе.

Ключевые слова: плазма, токамак, вращение плазмы, радиальное электрическое поле, L–H-переход.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.06.59930.20144

Инжекция пучка атомов высокой энергии (Neutral Beam Injection, NBI) является одним из основных методов дополнительного нагрева плазмы в установках с магнитным удержанием горячей плотной плазмы с параметрами, близкими к необходимым для осуществления управляемого термоядерного синтеза. Особую роль играют возникающее в плазме под воздействием инжекции вращение и связанное с ним радиальное электрическое поле. Радиальное электрическое поле играет важную роль в иницировании переключения режимов удержания в тороидальных установках. Такие исследования проводятся на различных токамаках и стеллараторах долгие годы [1,2], однако механизмы генерации вращения плазмы и радиального электрического поля еще не выяснены до конца. Механизмы, ответственные за генерацию вращения плазмы, многочисленны (прямая передача импульса, радиальные токи неудерживаемых частиц, искусственно создаваемые электрические поля и др.) и по-разному проявляются в разных пространственных областях плазмы и при разной геометрии эксперимента, в частности при ко- и контр-инжекции [3].

В настоящей работе представлены результаты измерения скорости тороидального вращения плазмы в токамаке ТУМАН-3М при ко-инжекции атомарного высокоэнергичного пучка и приводится оценка генерируемого при этом радиального электрического поля.

Эксперименты проводились на токамаке ТУМАН-3М ($R = 0.53$ м, $a = 0.23$ м, $T_e(0) = 400(L)–700(H)$ эВ, $\langle n_e \rangle = 1.5 \cdot 10^{19}(L)–4 \cdot 10^{19}(H)$ м⁻³, $I_p = 123–150$ кА, $B_t = 0.7–1$ Т, энергия атомарного пучка $W_b \sim 18–20$ кэВ, мощность инжекции $P_b \geq 150$ кВт, буквами L и H отмечены значения, разные в L- и H-модах). В части разрядов до импульса инжекции

иницировался L–H-переход. Инжекция водородного пучка проводилась по току плазмы с прицельным параметром 0.42 м. Измерения тороидального вращения проводились по доплеровскому смещению спектральных линий дублета однократно ионизованного углерода (C⁺) CII (657.8 и 658.3 нм) с потенциалом ионизации 11.26 эВ. Основной целью данных экспериментов было исследование возможности реализации диагностики FIDA (Fast Ion D-alpha) для изучения функции распределения быстрых ионов (Fast Ions, FI) [4], а наблюдение доплеровских сдвигов в спектре линии углерода явилось дополнительной диагностической возможностью. Вообще говоря, скорость вращения примеси не должна совпадать со скоростью вращения основного иона, однако этот метод часто используется как для измерения скорости вращения, так и для определения величины и пространственного распределения радиального электрического поля [5]. Схема измерений приведена на рис. 1, а. Она включает в себя монохроматор МДР-2 с CCD-камерой HS103H [6], установленной вместо выходной щели, световод, объектив и зеркало, установленное внутри камеры токамака для обеспечения требуемого направления линии наблюдения. Оно составляло угол 61° с направлением инжекции атомарного пучка.

Временные зависимости основных сигналов показаны на рис. 1, б. В этом разряде водородный атомарный пучок инжектировался в водородную плазму в интервале $t = 60–84$ мс. В момент времени $t = 49.5$ мс (т.е. примерно за 10 мс до начала импульса нейтральной инжекции) в плазме инициировался омический L–H-переход с помощью короткого (длительностью 5 мс) импульса газонапуска для увеличения плотности плазмы во время атомарной инжекции. На рис. 2 показаны необработанные

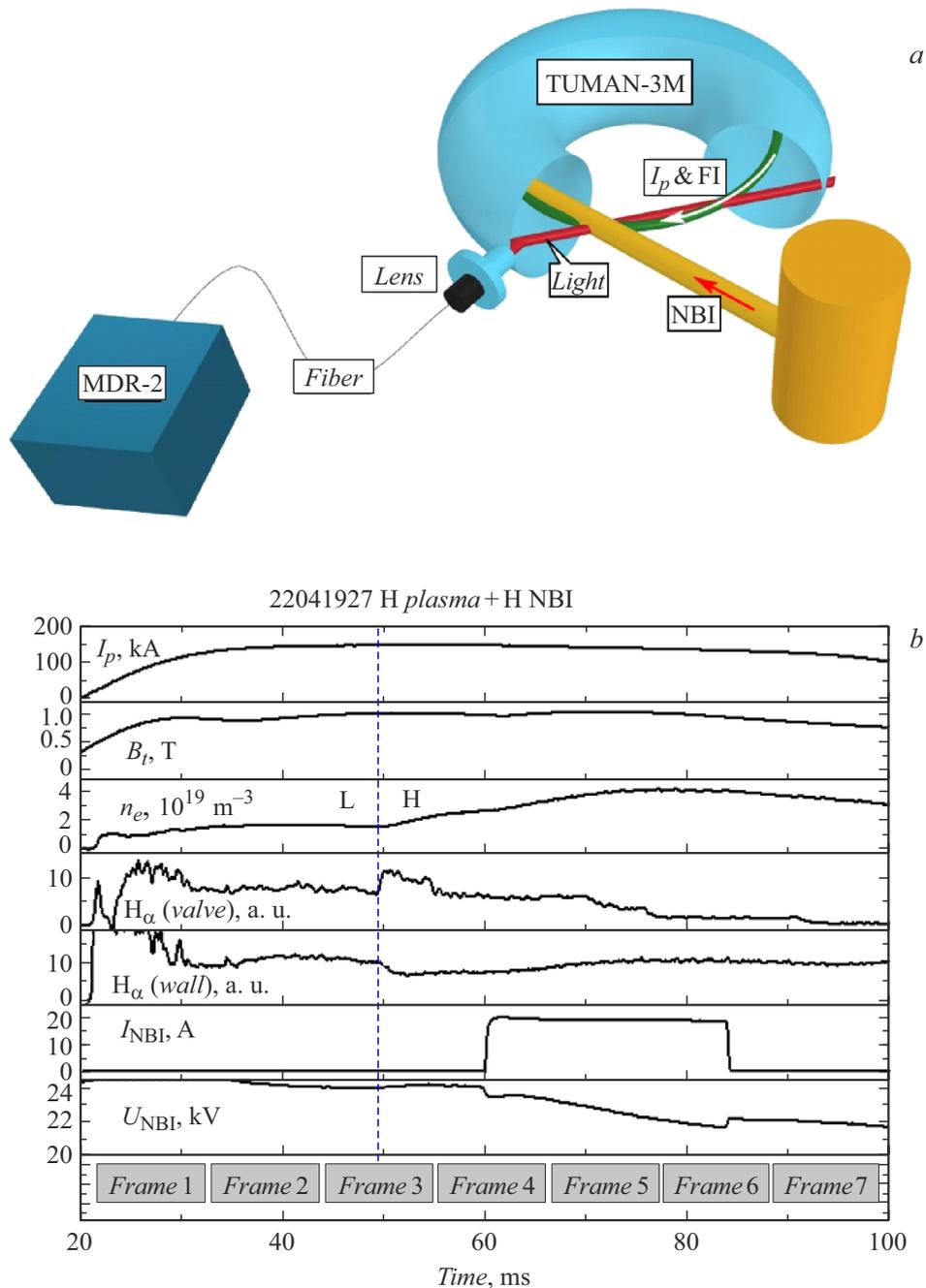


Рис. 1. *a* — оптическая схема измерений; *b* — временная эволюция параметров разряда. Сверху вниз: ток плазмы, тороидальное магнитное поле, среднехордовая центральная плотность, свечение линии H_α вблизи клапана газонапуска и вблизи стенки, импульс инжекции, кадры CCD-камеры. Энергия инжекции $W_b \sim 22$ keV, ток пучка 19 kA.

ные спектры излучения дублета линии $\Pi\Pi$ в разряде 22041927. Хорошо видно немономонное изменение положения линий дублета $\Pi\Pi$ от кадра к кадру при переходе от омической фазы разряда (кадры 2 и 3) к омической H-моду (кадр 4) и далее к фазе инжекции (кадры 5 и 6). Смещение центра линий невелико по сравнению с шириной контура, однако может быть надежно определено с помощью аппроксимации гауссовским контуром. Результаты такой обработки приведены на рис. 3, *a*.

Положение центров спектральных линий дублета $\Pi\Pi$ в кадрах 2 и 3 примерно одинаково и принималось за начало отсчета спектральных сдвигов, поскольку в этой фазе разряда отсутствуют предполагаемые внешние источники вращательного момента плазмы, а возможное собственное вращение плазмы (так называемое intrinsic toroidal rotation) имеет весьма малую скорость [1]. В кадре 4 наблюдается сдвиг в коротковолновую сторону на $\Delta\lambda = 0.03$ nm, который в кадрах 5 и 6 сменяет-

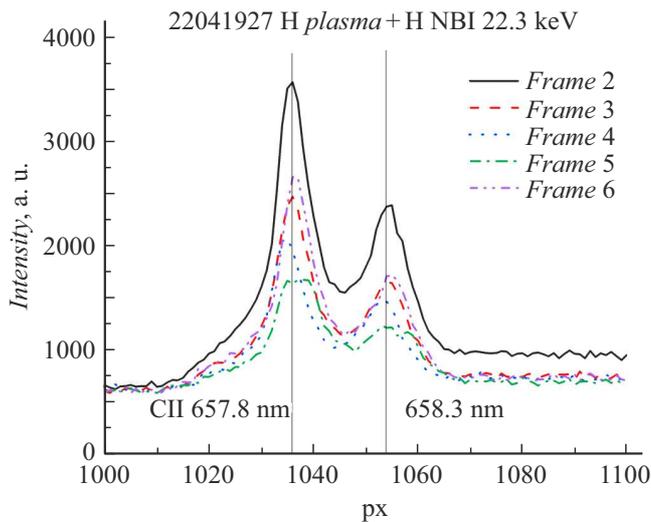


Рис. 2. Спектр излучения дублета линии СII 657.8 и 658.3 nm в разряде 22041927 с инъекцией и L–H-переходом. Вертикальными линиями отмечены положения несмещенных составляющих дублета.

ся сдвигом в сторону длинных волн на $\Delta\lambda = 0.03$ и 0.02 nm соответственно. В данных экспериментах из-за неоптимального выбора режима синхронизации запуска CCD-камеры и системы сбора токамака L–H-переход происходил примерно посередине кадра 3, а включение импульса инъекции — примерно посередине кадра 4. Поэтому регистрируемая эволюция спектральных сдвигов и скорости тороидального вращения от чисто омического режима к режиму омической H-моды и далее к режиму инъекции выглядит несколько искаженной. Тем не менее можно утверждать, что во время действия импульса дополнительного газонапуска, инициирующего L–H-переход, в интервале $t = 49$ – 55 ms, наблюдается увеличение скорости тороидального вращения в направлении по току плазмы, а после момента времени $t = 65$ ms (при переходе от кадра 4 к кадру 5) скорость вращения меняет направление на противоположное. Оценка проекции скорости тороидального вращения на линию наблюдения дает величину -12.5 km/s в кадре 4 (знак „минус“ соответствует вращению к приемнику наблюдения, т.е. по току плазмы и по направлению инъекции атомарного пучка, см. рис. 1). В кадрах 5 и 6 скорость тороидального вращения направлена навстречу току плазмы и направлению инъекции и имеет величину проекции на направление наблюдения 13.2 и 8.5 km/s соответственно.

Обсудим физические эффекты, которые могут быть ответственны за наблюдаемую эволюцию спектров линии СII. В первую очередь важно выяснить пространственную локализацию области, из которой принимается излучение линии СII, и процесс возбуждения, ответственный за его возникновение. Поскольку весьма интенсивное излучение дублета СII 657.8 и 658.3 nm регистрируется в омической фазе разряда, в кадрах 2

и 3 в отсутствие инжектированного атомарного пучка данное излучение не может быть связано с перезарядкой иона C^{2+} на атомах пучка. Потенциал ионизации иона нейтрального углерода с образованием иона C^+ составляет 11.26 eV. Это означает, что указанный ион существует преимущественно на периферии плазмы токамака (в этой области по данным томсоновской диагностики $T_e \sim 20$ eV). Оценки, учитывающие скорость ионизации атомарного углерода в зависимости от плотности и электронной температуры, позволяют утверждать, что ион C^+ существует на глубине до 3 – 5 cm от границы плазмы. Таким образом, наиболее вероятно возбуждение иона C^+ электронным ударом на периферии шнура, где угол между направлением тороидальной скорости иона и линией наблюдения составляет примерно 45° . С учетом этого скорости тороидального вращения в кадрах 4, 5 и 6 составляют -17.6 , 18.6 и 12 km/s. На рис. 3, b приведены результаты измерения тороидального вращения в чисто омическом разряде (без инъекции) 22041921 с L–H-переходом. Также на этом рисунке приведены результаты измерения смещения линии СII 657.8 nm в разряде 22052506 (треугольники) без L–H-перехода. Как видно из рисунка, сдвиг линии углерода в этом разряде пренебрежимо мал. Этот факт позволяет также заключить, что в регистрируемых сдвигах отсутствует заметная акустическая или электромагнитная наводка на измерительную аппаратуру.

Как видно из сравнения рис. 3, a и b, эволюция скорости тороидального вращения в двух сценариях — с инъекцией атомарного пучка и без нее — практически одинакова. Это позволяет утверждать, что наблюдаемое вращение не связано с наличием пучка быстрых ионов и взаимодействием его с плазмой, а объясняется другими эффектами. С другой стороны, в обоих рассматриваемых разрядах в момент времени $t = 50$ ms, т.е. примерно посередине кадра 3, имел место L–H-переход. Резонно предположить, что именно L–H-переход и является причиной наблюдаемой эволюции скорости тороидального вращения. В токамаке ТУМАН-3М омический переход инициируется коротким дополнительным импульсом газонапуска, который хорошо идентифицируется по возрастанию свечения линии H_α вблизи клапана газонапуска (рис. 1, b, сигнал $H_\alpha(\text{valve})$, $t = 49$ – 55 ms), и сопровождается заметным кратковременным возмущением периферийной плазмы. Что является причиной такого влияния импульсного напуска газа на тороидальное вращение на периферии, в настоящий момент неясно. Известны работы, в которых сильное скачкообразное возмущение скорости тороидального вращения наблюдалось при наращивании плотности [7,8]. С другой стороны, увеличение плотности нейтралей на периферии должно, наоборот, способствовать затуханию вращения [1]. После завершения L–H-перехода (и после окончания инициирующего его импульса газонапуска, см. кадры 5 и 6 на рис. 3, a и b), т.е. в режиме самоподдерживающейся H-моды (чисто омической в разряде 22041921), скорость тороидального вращения достигает значений порядка

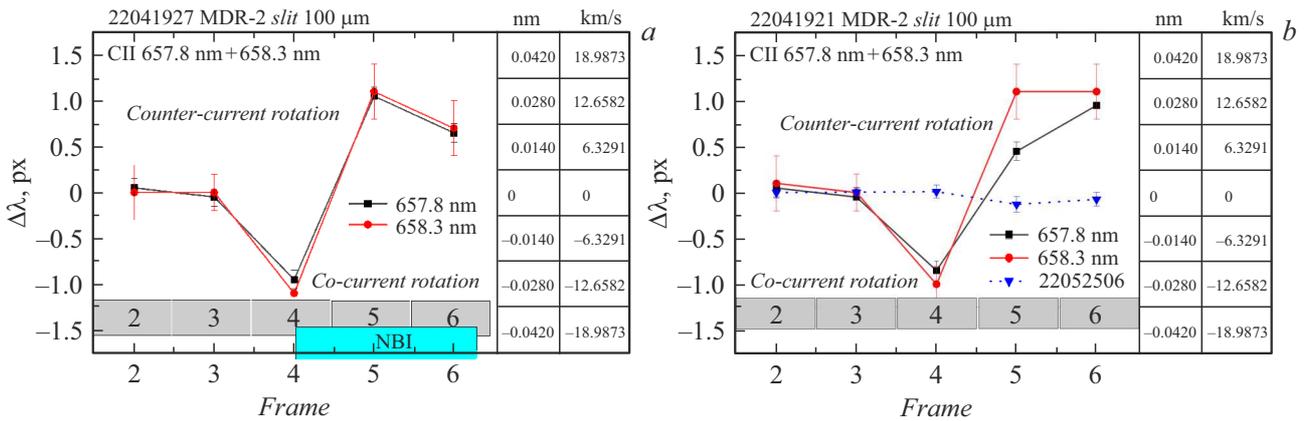


Рис. 3. Временная эволюция спектрального сдвига линий дублета CII: *a* — в разряде 22041927 с инъекцией и L–H-переходом (кружки и квадраты), *b* — в разряде 22041921 с L–H-переходом без инъекции (кружки и квадраты) и в разряде 22052506 с инъекцией, но без L–H-перехода (треугольники).

$V_t \sim 18$ km/s в противоположном направлении, т.е. навстречу току плазмы. Ранее [9] при измерении сдвига спектра линии бора BIV не было зарегистрировано заметного тороидального вращения в омической H-моды, что может быть связано с тем, что этот ион имеет более высокий потенциал ионизации (259.37 eV) и излучает соответственно из другой, более глубокой, области плазмы. Вклад тороидального вращения в формирование радиального электрического поля можно оценить как $E_r = -V_t B_p = -1.6$ kV/m (здесь B_p — полоидальное поле). Данная оценка заметно ниже по абсолютной величине значения, измеренного ранее в омической H-моды с помощью ленгмюровских зондов: $E_r = -3$ kV/m [10], что может объясняться как тем, что в этой оценке не учтен вклад от неоклассического электрического поля, так и тем, что зондовые измерения являются хорошо локализованными по радиусу, а сделанная выше оценка по скорости тороидального вращения — усредненной по некоторой пространственной области вблизи периферии плазмы. Более точное определение величины E_r требует как пространственно-разрешенных измерений скорости тороидального и полоидального вращения, так и численного моделирования.

Таким образом, в исследованном режиме инъекции ($W_b \sim 22$ keV, ко-инъекция, H → H или D) ее влияние на электрическое поле и тороидальное вращение не обнаружено. Основной вклад в генерируемое E_r и V_t вносит переход в H-режим.

Финансирование работы

Работа стандартных диагностик токамака ТУМАН-3М осуществлялась при поддержке госконтракта ФТИ им. А.Ф. Иоффе FFUG-0024-0028. Эксперименты с нейтральной инъекцией осуществлены при поддержке госконтракта ФТИ им. А.Ф. Иоффе 0034-0021-0001. Исследования радиального электрического поля на то-

камаке ТУМАН-3М поддержаны грантом РНФ (проект 22-12-00062).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J.E. Rice, Plasma Phys. Control. Fusion, **58**, 083001 (2016). DOI: 10.1088/0741-3335/58/8/083001
- [2] K. Ida, J.E. Rice, Nucl. Fusion, **54**, 045001 (2014). DOI: 10.1088/0029-5515/54/4/045001
- [3] S.V. Lebedev, L.G. Askinazi, E.V. Chernyshev, M.A. Irzak, V.A. Kornev, S.V. Krikunov, A.D. Melnik, D.V. Razumenko, V.V. Rozhdestvensky, A.I. Smirnov, A.S. Tukachinsky, M.I. Vild'junas, N.A. Zhubr, Nucl. Fusion, **49**, 085020 (2009). DOI: 10.1088/0029-5515/49/8/085029
- [4] Л.К. Шувалова, Г.И. Абдуллина, Л.Г. Аскинази, А.А. Белокуров, Н.А. Жубр, Е.О. Киселев, В.А. Корнев, С.В. Лебедев, Д.В. Разуменко, А.И. Смирнов, А.С. Тукачинский, Письма в ЖТФ, **50**(11), 18 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.11.57904.19843. [L.K. Shuvalova, G.I. Abdullina, L.G. Askinazi, A.A. Belokurov, N.A. Zhubr, E.O. Kiselev, V.A. Kornev, S.V. Lebedev, D.V. Razumenko, A.I. Smirnov, A.S. Tukachinsky, Tech. Phys. Lett., **50**(6), 16 (2024). DOI: 10.61011/TPL.2024.06.58471.19843].
- [5] K.H. Burrell, Phys. Plasmas, **27**, 060501 (2020). DOI: 10.1063/1.5142734
- [6] <https://www.czl.ru/catalog/spektr/digital-cameras/proscan-hs-103h.html>
- [7] A. Bortolon, B.P. Duval, A. Pochelon, A. Scarabosio, Phys. Rev. Lett., **97**, 235003 (2006). DOI: 10.1103/PhysRevLett.97.235003
- [8] M.L. Reinke, J.E. Rice, A.E. White, M. Greenwald, N.T. Howard, P. Ennever, C. Gao, A.E. Hubbard, J.W. Hughes, Plasma Phys. Control. Fusion, **55**, 012001 (2013). DOI: 10.1088/0741-3335/55/1/012001

- [9] 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].
- [10] L.G. Askinazi, V.E. Golant, V.A. Kornev, S.V. Krikunov, S.V. Lebedev, A.G. Somov, A.S. Tukachinsky, M.I. Vildjumas, N.A. Zhubr, in *31st EPS Conf. on Plasma Physics* (London, 2004), vol. 28G, P-4.153. https://lac913.epfl.ch/epsppd3/2004/pdf/P4_153.pdf