

04

## Расчеты вращательного момента, прикладываемого к плазме при инъекции высокоэнергичного нейтрального пучка в токамаке ТУМАН-3М

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

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

Поступило в Редакцию 23 июля 2024 г.

В окончательной редакции 7 октября 2024 г.

Принято к публикации 8 октября 2024 г.

Проведены расчеты вращательного момента, генерируемого в плазме при инъекции высокоэнергичного нейтрального пучка в направлении по и навстречу току в токамаке ТУМАН-3М. Исследована зависимость вращательного момента в центральной и краевой областях плазмы от мощности инъекции нейтрального пучка, плотности плазмы, изотопного состава пучка и плазмы и других параметров. Найдена оптимальная плотность, обеспечивающая максимальную величину вращательного момента. При инъекции водородного пучка в водородную плазму ( $H_b \rightarrow H_p$ ) вращательный момент вблизи оси оказывается больше, чем в сценариях  $D_b \rightarrow H_p$ ,  $D_b \rightarrow D_p$ ,  $H_b \rightarrow D_p$ . На основе расчета вращательного момента оценено радиальное электрическое поле, возникающее на краю плазмы.

**Ключевые слова:** токамак, потенциал плазмы, радиальное электрическое поле, нейтральная инъекция, тороидальное вращение плазмы.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.03.59821.20070

Инъекция высокоэнергичных нейтральных атомов является эффективным методом нагрева плазмы, генерации вращения и радиального электрического поля в современных установках управляемого термоядерного синтеза. Тороидальное вращение плазмы, генерируемое быстрыми ионами, а также потери быстрых ионов могут приводить к сильной пространственной неоднородности радиального электрического поля [1,2]. Пространственное распределение скорости тороидального вращения и связанного с ним радиального электрического поля зависит не только от параметров фоновой плазмы и мощности инъекции высокоэнергичного нейтрального пучка (ИНП), но и от геометрии инъекции, в частности от того, направлена ли скорость инжектируемых атомов по току плазмы (ко-инъекция) или навстречу ему (контр-инъекция). Генерация тороидального вращения при ИНП представляет интерес с точки зрения ее влияния на возможность подавления магнитогиродинамических неустойчивостей [3]. Отметим также, что генерация неоднородного электрического поля на периферии шнура может способствовать инициированию L–H-перехода [4].

Настоящая работа посвящена расчету вращательного момента (ВМ), генерируемого в плазме пучком быстрых ионов при различных сценариях инъекции в токамаке ТУМАН-3М. Отметим, что решение уравнения диффузии ВМ выходит за рамки данной публикации и будет предметом дальнейших исследований.

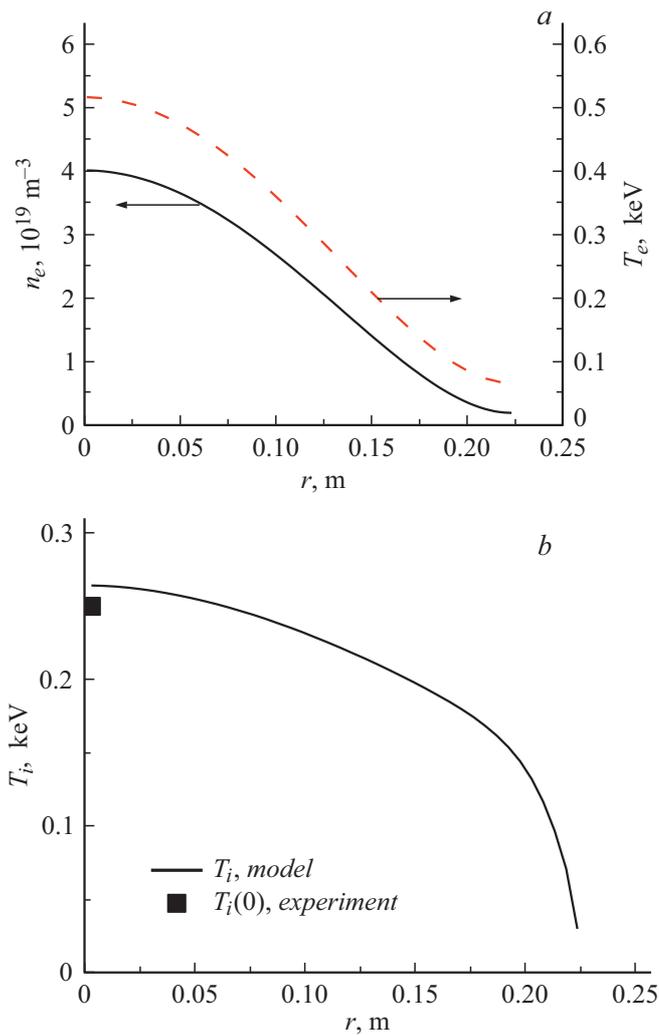
Внешним источником ВМ плазмы является тангенциальная инъекция высокоэнергичных (15–24 keV) ато-

мов водорода или дейтерия. Расчеты ВМ, возникающего в плазменном разряде при ИНП, позволяют оптимизировать параметры плазмы и нагревного пучка, при которых скорость тороидального вращения будет максимальной. Расчеты проводились с помощью кода ASTRA (automated system for transport analysis) версии 6 [5] и кода NUBEAM [6]. NUBEAM представляет собой комплексную вычислительную платформу, предназначенную для описания процессов, происходящих в плазме установок с магнитным удержанием при ИНП.

В расчетах использовались следующие параметры плазмы и инжекционного пучка: большой радиус тора  $R_p = 0.53$  м, малый радиус тора  $a_p = 0.23$  м, электронная температура в центре  $T_e(0) = 400\text{--}700$  eV, среднорядовое значение электронной концентрации  $\bar{n}_e = (1\text{--}6) \cdot 10^{19}$  м<sup>-3</sup>, плазменный ток  $I_p = 120\text{--}180$  кА, тороидальное магнитное поле  $B_t = 0.7\text{--}1$  Т, энергия нагревного пучка  $E_b \geq 16$  keV, мощность инъекции  $P_b \geq 150$  kW.

Для определения коэффициента запаса устойчивости  $q(r)$  и вкладываемой мощности омического нагрева  $P_{joul} = E(r)j(r)$  в модели ASTRA решалось уравнение диффузии полоидального магнитного поля с эволюцией  $I_p(t)$ , соответствующей экспериментальной, в качестве граничного условия. При этом использовалась неоклассическая проводимость по Хиршману [7], величина эффективного заряда составляла  $Z_{eff} = 2\text{--}3$ .

В расчетах использовались экспериментальные профили  $n_e(r, t)$  и  $T_e(r, t)$ . На рис. 1, а приведены исходные профили  $n_e(r)$  и  $T_e(r)$  в режиме омического нагрева.



**Рис. 1.** Экспериментальные профили электронной концентрации  $n_e$  и электронной температуры  $T_e$  (a) и смоделированный в коде ASTRA профиль ионной температуры  $T_i$  (b), используемый в расчетах с помощью кода NUBEAM.

Эволюция  $T_i(r)$  была получена в результате моделирования с помощью кода ASTRA. Для этого решалось уравнение переноса тепла для ионного компонента в предположении неоклассической ионной теплопроводности, умноженной на „коэффициент аномальности“, который подбирался так, чтобы модельное значение  $T_i(0)$  в центре плазмы совпадало с экспериментальными данными, полученными с помощью анализатора атомов перезарядки [8]. Профиль  $T_i(r)$  в режиме омического нагрева представлен на рис. 1, b.

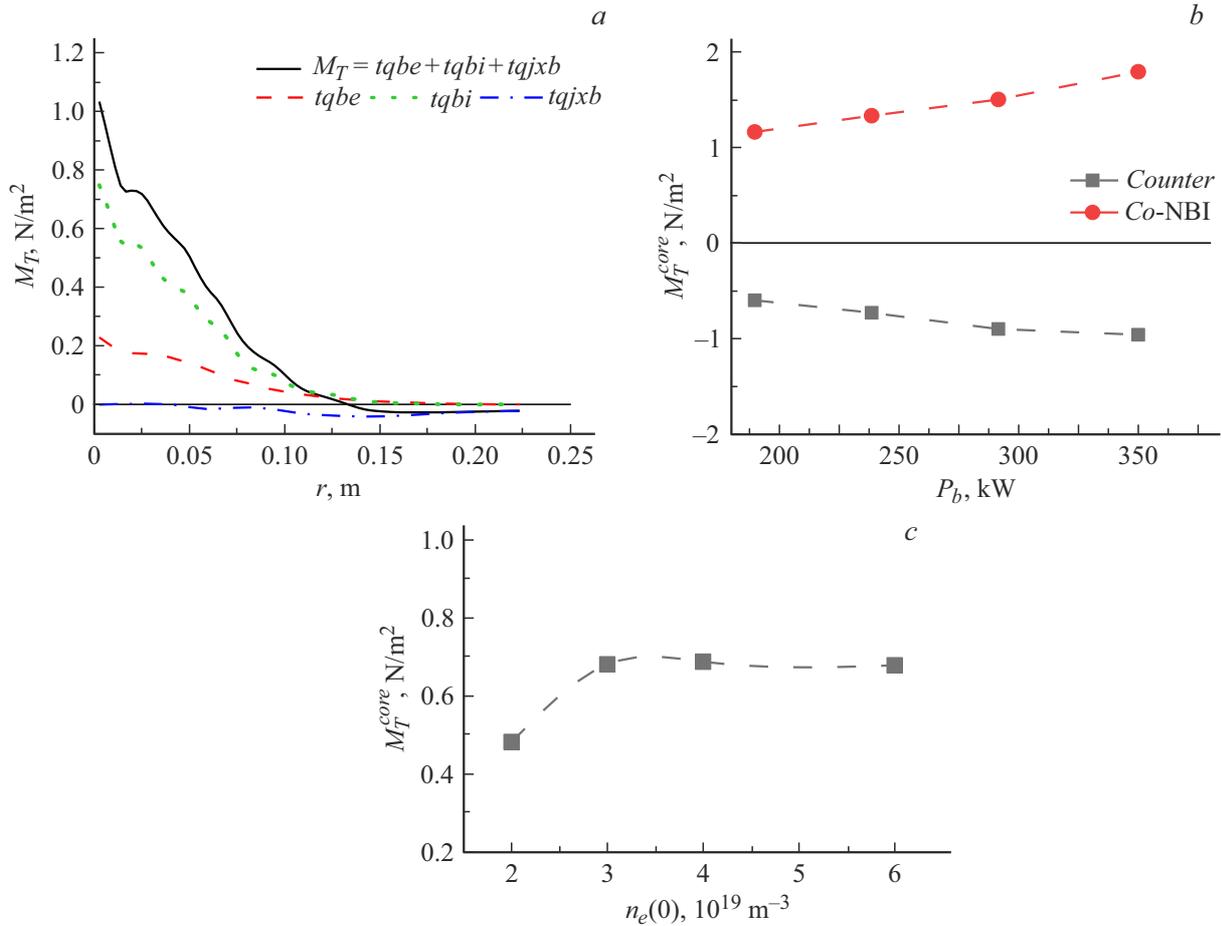
Распределение плотности ВМ  $M_T(r)$  рассчитывалось с помощью кода NUBEAM. На рис. 2, a представлены данные расчета составляющих  $M_T(r)$ . Здесь  $tqbe$  и  $tqbi$  характеризуют столкновительную передачу импульса от захваченных ионов электронной и ионной компонентам плазмы соответственно,  $tqjxb$  характеризует передачу импульса посредством силы Ампера  $J_r \times B$ , возникающей за счет появления в плазме радиального тока,

компенсирующего направленный наружу радиальный ток быстрых ионов. На рис. 2, b показан результат расчета зависимости  $M_T^{core}$  в центральной ( $r < 0.22a_p$ ) области плазмы от мощности ИНП  $P_b$  при ко- и контр-инжекции. В этих расчетах ток пучка изменялся по закону  $j_b \propto E_b^{1.5}$ , соответствующему вольт-амперной характеристике ионного источника, используемого в системе нейтральной инжекции токамака ТУМАН-3М. Рост мощности пучка от 190 до 350 kW приводит к увеличению  $M_T^{core}$  на 65%. При контр-инжекции знак ВМ становится отрицательным, а абсолютная величина  $M_T^{core}$  также медленно растет с ростом  $P_b$ .

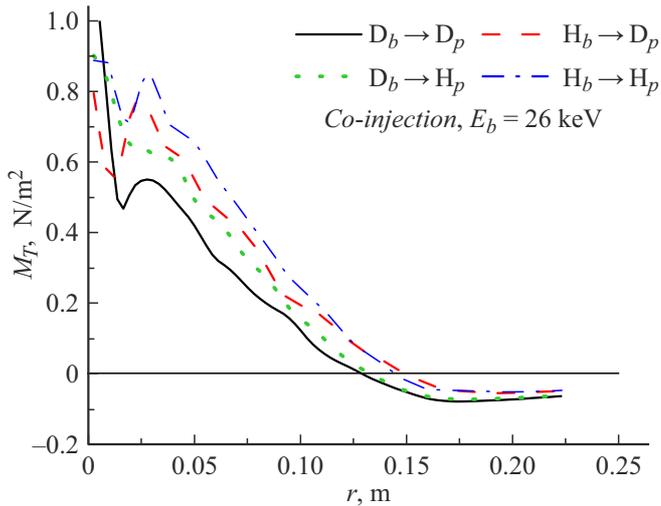
На рис. 2, c представлены результаты расчета зависимости  $M_T^{core}$  от  $n_e(0)$  в разрядах с ИНП. Направление инжекции совпадает с направлением  $I_p$ . Мощность ИНП  $P_b = 250 \text{ kW}$ . Расчет зависимости  $M_T^{core}$  от  $n_e(0)$  показывает рост  $M_T^{core}$  в центральной области плазмы с ростом концентрации вплоть до  $n_e(0) = 3 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , а при  $n_e(0) > 3 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$  величина  $M_T^{core}$  перестает расти и не зависит от  $n_e(0)$ . Такое поведение  $M_T^{core}$  связано с неполной ионизацией нейтральных частиц пучка в плазме при  $n_e(0) \leq 3 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$  и насыщением роста  $M_T^{core}$  при полном захвате пучка при  $n_e(0) \geq 3 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ . На рис. 3 представлены результаты расчетов профилей  $M_T(r)$  для следующих изотопных составов пучка (индекс  $b$ ) и плазмы (индекс  $p$ ) при ко-инжекции:  $H_b \rightarrow H_p, D_b \rightarrow H_p, H_b \rightarrow D_p, D_b \rightarrow D_p$ . Во всех сценариях  $E_b = 26 \text{ keV}$ . При переходе с дейтериевого пучка на водородный  $P_b$  была увеличена в моделировании в 1.4 раза за счет роста тока пучка. Это сделано для того, чтобы скомпенсировать уменьшение вкладываемого импульса при переходе к более легкому изотопу пропорционально корню из его массы (при постоянной  $E_b$ ). Из рис. 3 видно, что в центральной области плазмы ( $r < 0.22a_p$ ) величина  $M_T(r)$  в сценарии  $H_b \rightarrow H_p$  оказывается выше, чем в других сценариях. Это свидетельствует о более высокой эффективности поглощения водородного пучка в водородной плазме.

На периферии плазмы, при малом радиусе плазмы  $r > 0.5a_p$ ,  $M_T(r)$  меняет направление, что, очевидно, является следствием генерации отрицательного момента  $tqjxb$  за счет появления направленного наружу радиального тока быстрых ионов (рис. 2, a), текущего по плазме компенсирующего тока, и соответствующего ему радиального электрического поля, направленного внутрь [9]. Этот эффект должен быть сильнее выражен при контр-инжекции из-за худшего удержания быстрых ионов, но он имеет место и при ко-инжекции.

В экспериментах по исследованию эволюции потенциала плазмы при ко-инжекции проводились измерения с помощью диагностического пучка тяжелых ионов (НВП) [10], в которых наблюдалось уменьшение потенциала плазмы примерно на 100–150 V, что соответствует генерации более отрицательного радиального электрического поля ( $E_r \propto 1.0\text{--}1.5 \text{ kV/m}$ ). Аналогичные расчеты сценария со схожими параметрами плазмы, но в режиме с контр-инжекцией показывают большую



**Рис. 2.** Результаты расчета профилей составляющих внешнего вращательного момента  $M_T^{\text{core}}$  (a); зависимости  $M_T^{\text{core}}$  от мощности нагревного пучка  $P_b$  (b); зависимости  $M_T^{\text{core}}$  от величины центральной концентрации  $n_e(0)$  (c).



**Рис. 3.** Результаты расчета величины внешнего вращательного момента  $M_T(r)$  при различных сценариях инжекции.

величину отрицательного ВМ периферии. Данное сравнение находится в качественном согласии с тем фак-

том, что на токамаке ТУМАН-3М L–H-переход легче осуществляется именно при контр-инжекции, а при ко-инжекции переход затруднен и требует дополнительных воздействий на плазму, например, импульса газонапуска. Ранее в экспериментах с контр-инжекцией на токамаке ТУМАН-3М [11] наблюдалось заметно более сильное поле на периферии ( $E_r \propto 4\text{--}5 \text{ kV/m}$ ).

Таким образом, результаты расчетов указывают на наличие оптимальной величины концентрации плазмы  $n_e(0) = 3 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , при которой величина  $M_T^{\text{core}}$  достигает максимума при ИНП в условиях токамака ТУМАН-3М. Кроме того, с помощью расчетов была продемонстрирована сильная зависимость  $M_T^{\text{core}}$  от  $P_b$ . Рост  $P_b$  от 190 до 350 kW приводит к увеличению  $M_T^{\text{core}}$  на 65%, при этом рост  $M_T^{\text{core}}$  с увеличением  $P_b$  происходит медленнее, чем ожидалось. После учета прямых потерь мощности пучка изменение величины  $M_T^{\text{core}}$  хорошо согласуется с изменением поглощенной мощности пучка. Результаты расчетов позволили выбрать оптимальный для генерации ВМ изотопный состав плазмы и нагревного пучка. Изменение величины  $M_T^{\text{core}}$  хорошо согласуется с изменением поглощенной мощности пучка в зависимости от изотопного состава. В усло-

виях  $H_b \rightarrow H_p$  величина  $M_T^{core}$  в центральной области плазмы имеет максимальное значение (по сравнению с другими сценариями инжекции). Отрицательная величина вносимого ВМ на периферии обусловлена электродинамической составляющей  $J_r \times B$ , в свою очередь возникающей из-за наличия заметного направленного внутрь радиального тока по плазме, компенсирующего ток быстрых ионов, вызванный орбитальными эффектами и направленный наружу.

Полученное пространственное распределение ВМ планируется использовать в дальнейшем в качестве источника при численном решении уравнения переноса тороидального момента с помощью кода ASTRA версии 7, что позволит провести сравнение с величиной экспериментально измеренной скорости тороидального вращения, а также получить профиль радиального электрического поля, ассоциированного с тороидальным вращением.

### Финансирование работы

Работа стандартных диагностик токамака ТУМАН-3М осуществлялась при поддержке госконтракта ФТИ им. А.Ф. Иоффе 0040-2024-0028. Эксперименты с нейтральной инжекцией осуществлены при поддержке госконтракта ФТИ им. А.Ф. Иоффе 0034-0021-0001. Исследования радиального электрического поля на токамаке ТУМАН-3М поддержаны грантом 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] ITER Physics Expert Group on Disruptions, Plasma Control and MHD, ITER Physics Basis Editors, *Nucl. Fusion*, **39**, 2251 (1999). DOI: 10.1088/0029-5515/39/12/303
- [4] P. Gohil, G.R. McKee, D. Schlossberg, L. Schmitz, G. Wang, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **123**, 012017 (2008). DOI: 10.1088/1742-6596/123/1/012017
- [5] G.V. Pereverzev, P.N. Yushmanov, *ASTRA. Automated system for transport analysis in a tokamak*, report IPP 5/98 (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, 2002). [https://pure.mpg.de/rest/items/item\\_2138238\\_1/component/file\\_2138237/content](https://pure.mpg.de/rest/items/item_2138238_1/component/file_2138237/content)
- [6] *NUBEAM Help* [Электронный ресурс]. <https://w3.pppl.gov/pshare/help/nubeam.htm>
- [7] S.P. Hirshman, R.J. Hawryluk, B. Birge, *Nucl. Fusion*, **17**, 611 (1977). DOI: 10.1088/0029-5515/17/3/016
- [8] A.D. Melnik, L.G. Askinazi, V.I. Afanasyev, V.A. Kornev, S.V. Lebedev, M.I. Mironov, V.G. Nesenevich, S.J. Petrov, S.Ya. Petrov, A.S. Tukachinsky, F.V. Chernyshev, *Instrum. Exp. Tech.*, **62** (3), 373 (2019). DOI: 10.1134/S0020441219030229
- [9] J.E. Rice, *Intrinsic and driven rotation in tokamak plasmas*, PSFC/JA-16-2 (MIT, Cambridge, Massachusetts, 2016). [https://library.psfc.mit.edu/catalog/reports/2010/16ja/16ja002/16ja002\\_full.pdf](https://library.psfc.mit.edu/catalog/reports/2010/16ja/16ja002/16ja002_full.pdf)
- [10] 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].
- [11] 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