

УДК 533.9.16

ГЕНЕРАЦИЯ БЕЗЫНДУКЦИОННЫХ ТОКОВ ПУТЕМ ИНЖЕКЦИИ ПУЧКА АТОМОВ В СФЕРИЧЕСКОМ ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М

© 2019 г. П. Б. Щёголев^{a,*}, В. Б. Минаев^a, Н. Н. Бахарев^a, В. К. Гусев^a, Е. О. Киселев^a,
Г. С. Курскиев^a, М. И. Патров^a, Ю. В. Петров^a, А. Ю. Тельнова^a

^a Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

* e-mail: peter_shchegolev@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 17.07.2018 г.

После доработки 19.09.2018 г.

Принята в печать 20.09.2018 г.

Представлены результаты исследования генерации токов увлечения атомным пучком в компактном сферическом токамаке Глобус-М. Эксперименты проводили в плазме токамака при тороидальном магнитном поле 0.4 или 0.5 Тл и токе плазмы 0.13–0.20 МА, прицельный параметр инжекции составлял 33 см. В экспериментах варьировали состав плазмы и нагревного пучка (водород, дейтерий), плотность плазмы и смещение плазменного шнура в вертикальном направлении. Генерацию безындукционных токов определяли по одновременному подъему тока и провалу напряжения на обходе. При инжекции как водородного, так и дейтериевого пучков в дейтериевую и водородную плазму получен заметный и воспроизводимый провал напряжения на обходе (до 0.5 В). Для обработки экспериментальных данных построена модель на основе кода ASTRA, позволяющая рассчитывать значения тока увлечения и бутстрэп-тока. Проведены расчеты доли безындукционных токов в зависимости от плотности плазмы при инжекции водородного пучка (28 кэВ, 0.5 МВт) в дейтериевую плазму. Проанализированы результаты экспериментов по внесевой инжекции пучка, полученной путем вертикального смещения плазменного шнура. Исследовано влияние увеличения тороидального магнитного поля на расход полоидального магнитного потока в разрядах с инжекцией пучка атомов.

DOI: 10.1134/S0367292119020082

1. ВВЕДЕНИЕ

Инжекция нейтрального пучка представляет собой один из основных способов для нагрева плазмы и генерации тока в токамаке-реакторе [1], поскольку обеспечивает возможность его стационарной работы. Инжекция пучка атомов особенно важна в термоядерных источниках нейтронов (ТИН) на основе компактного сферического токамака, поскольку генерация нейтронов в них преимущественно будет происходить при взаимодействии высокоэнергичных частиц пучка с плазмой токамака. Одной из целей экспериментов на токамаке Глобус-М, близком по размерам и аспектному отношению к разрабатываемым компактным ТИН на базе сферического токамака [2–4], являлось исследование и демонстрация эффективного нагрева плазмы и генерации токов увлечения пучком атомов, NBCD (Neutral Beam Current Drive).

Результаты первых экспериментов по NBCD в компактном сферическом токамаке Глобус-М представлены в работе [5]. Дальнейшие исследо-

вания условий возникновения и поддержания безындукционных токов в данной установке необходимы для решения принципиальной проблемы будущих ТИН на базе компактного сферического токамака – организации защиты индуктора от потока нейтронов (компактный токамак имеет крайне ограниченное пространство для размещения обмотки индуктора), поскольку позволят отказать от центрального соленоида. Кроме того нейтральная инжекция представляет собой удобный инструмент влияния на профиль тока плазмы, а значит, открывает возможность получения так называемых продвинутых режимов работы токамака [6], для достижения которых требуется формирование плоского или обращенного пространственного профиля коэффициента запаса устойчивости q . Чтобы сформировать такой профиль q , необходима эффективная генерация внесевого тока, например, с помощью внесевой нейтральной инжекции. Обзор современных результатов по генерации токов пучком атомов, достигнутых на разных токамаках, приведен в работе [7]. Наиболее тщательные эксперименты вы-

полнены на токамаке традиционного типа DIII-D. В работе [8] показано, что наилучший результат генерации тока пучком атомов достигается, когда неиндукционный ток сосредоточен в месте максимальной параллельности пучка силовым линиям магнитного поля. В сферическом токамаке использование внеосевой инжекции более выгодно, так как поперечное пучку полоидальное магнитное поле сопоставимо по величине с тороидальным. Это положение впервые было экспериментально подтверждено на сферическом токамаке MAST [9], в котором доля генерируемого пучком тока достигала 20–30% от полного тока плазмы 0.6 МА. Одновременно генерация безындукционного тока пучком приводила к уширению профиля плотности тока и повышению устойчивости плазмы. Сферический токамак Глобус-М обладает рядом преимуществ для проведения экспериментов по внеосевой инжекции, по сравнению с упомянутыми выше установками, поскольку тороидальный ионный ток $I_{CD} \propto 1/R$, а большой радиус плазмы R составляет 0.33–0.36 м (для сравнения, в токамаке MAST $R \sim 0.85$ м, а в установке DIII-D $R \sim 1.6$ м). Суммарная мощность нейтральной инжекции в экспериментах на токамаках MAST и DIII-D была выше и достигала 2.5–3.0 МВт, однако в установке Глобус-М значительно больше удельная мощность нагрева плазмы в расчете на единицу объема.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование генерации безындукционных токов проводили в плазменных разрядах токамака Глобус-М [10] с нейтральной инжекцией. Для получения пучка атомов с энергией до 30 кэВ, мощностью до 0.5 МВт и геометрическими размерами 4×20 см² использовали источник ионов ИПМ-2 инжектора установки (для экспериментов с увеличенным тороидальным магнитным полем использовали источник ИПМ-1 – энергия пучка до 30 кэВ, мощность до 1 МВт, геометрические размеры 6×26 см²) [11]. Контроль энергетического спектра пучка осуществляли с помощью оптической спектрометрической диагностики [12]. Эксперименты проводили в плазме токамака, имеющей диверторную конфигурацию с нижней X-точкой со смещением в вертикальном направлении ΔZ от –7 до +5 см и по большому радиусу ΔR от –1.5 до –2.5 см, при тороидальном магнитном поле $B_t = 0.4$ или 0.5 Тл, в диапазоне токов плазмы $I_p = 0.13$ –0.20 МА. Инжекцию пучка атомов производили в экваториальной плоскости тора в тангенциальном направлении по току плазмы, прицельный параметр составлял 33 см. В качестве рабочего газа для плазмы-мишени и инжектируемого пучка использовали во-

дород и дейтерий. Схема экспериментов приведена на рис. 1.

Среднехордовую электронную плотность определяли с помощью СВЧ-интерферометра. Эволюцию профилей электронной плотности и температуры измеряли с помощью диагностики томсоновского рассеяния [13]. Поведение ионного компонента плазмы исследовали с помощью двух анализаторов атомов перезарядки (NPA), один из которых направлен параллельно (NPA продольный), а другой – перпендикулярно направлению распространения пучка (NPA перпендикулярный) [14]. Ионную температуру также измеряли с помощью активной спектроскопии перезарядки (CXRS) [15]. Для бесконтактного измерения тока плазмы использовали пояс Роговского (измерительный трансформатор тока) [16]. Реконструкцию равновесия плазменного шнура для восстановления сценария его положения и формы в течение разряда проводили по коду EFIT на основе сигналов магнитных петель [17]. Для анализа экспериментальных данных применяли транспортный код ASTRA [18]. Потери быстрых частиц рассчитывали на основе измеренных энергетических спектров атомов перезарядки с помощью орбитального кода, предназначенного специально для сферических токамаков [19].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В экспериментах варьировали состав плазмы и нагревного пучка (водород, дейтерий), плотность плазмы, время старта импульса инжекции, смещение шнура вдоль большого радиуса и в вертикальном направлении, величину тороидального магнитного поля и параметры пучка (энергия, мощность, прицельный параметр).

При тангенциальной инжекции в плазму высокоэнергетических атомов вследствие их ионизации образуются высокоэнергичные ионы, обладающие направленной скоростью, часть импульса которых из-за кулоновских столкновений передается электронам и ионам плазмы, в результате чего в системе генерируется суммарный (состоящий из трех слагаемых) продольный ток. В экспериментах инжектируемый пучок имел то же направление, что и создаваемый трансформатором ток (случай ко-инжекции), поэтому часть тока, создаваемого индуктивно, замещалась током, увлекаемым пучком, что приводило к снижению напряжения на обходе плазмы, поскольку в токамаке Глобус-М ток плазмы поддерживается по заданной программе на постоянном уровне с помощью системы обратной связи. В результате генерацию безындукционных токов определяли по заметному провалу напряжения на обходе и одновременно подъему тока (до 3–5%) во время ин-

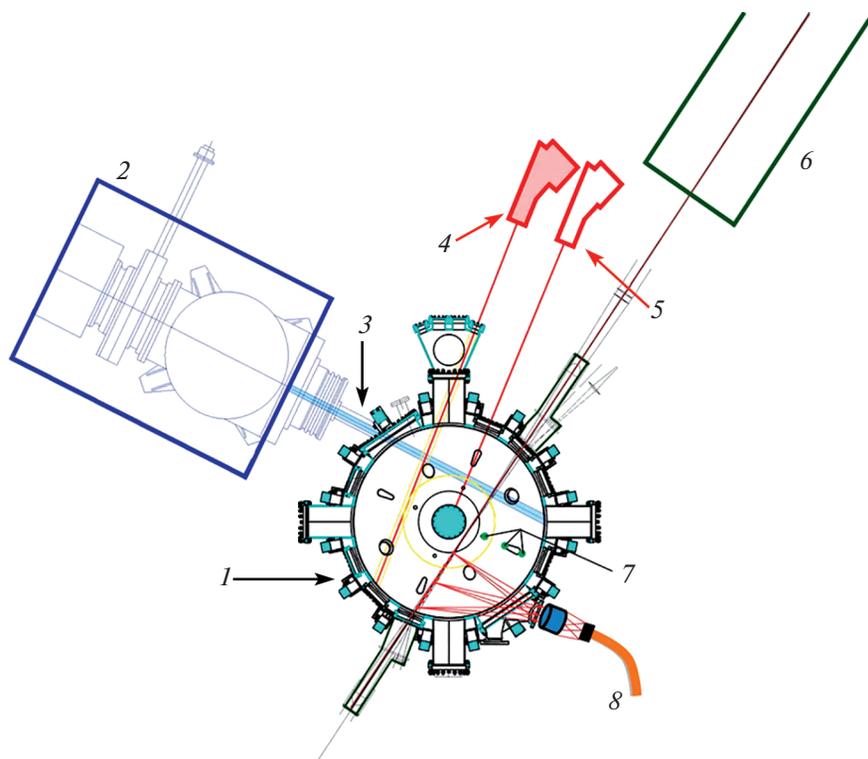


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — камера токамака; 2 — инжектор атомов; 3 — пучок атомов; 4 — NRA продольный; 5 — NRA перпендикулярный; 6 — лазер системы томсоновского рассеяния; 7 — хорды наблюдения микроволнового интерферометра; 8 — система сбора данных диагностики томсоновского рассеяния.

жекции пучка, вызванному временными задержками в работе системы обратной связи.

После проведения поисковых исследований был найден режим работы компактного сферического токамака с ощутимой долей генерируемого пучком атомов безындукционного тока. Для этого потребовалось инжектировать пучок с максимально достижимой энергией и предельной мощностью (для источника ИПМ-2: 0.6 и 0.5 МВт для водородного и дейтериевого атомного пучка соответственно). Выстрел инжектора производили на стадии плато тока на 165-й мс, в квазистационарной фазе разряда. Изменение прицельного параметра инжектора нейтральных частиц от 27 до 33 см показало, что наибольший провал напряжения на обходе плазмы U_l возникает при значении 33 см, при котором пучок атомов проходит ближе всего к магнитной оси плазменного шнура. В зависимости от разряда локальная плотность плазмы возрастает в 1.5–2 раза по мере приближения к магнитной оси, поэтому чем ближе к ней проходит пучок, тем в более плотную (с большей плотностью) область плазмы попадает, в результате чего снижаются потери частиц пучка “на пролет”.

Дальнейшие исследования генерации безындукционных токов с помощью пучка нейтральных частиц включали в себя оптимизацию усло-

вий эксперимента. Изучено влияние смещения плазменного шнура вдоль большого радиуса токамака на генерацию токов увлечения, которое представлено на рис. 2 на примере дейтериевой плазмы с $I_p = 0.2$ МА в разрядах с инжекцией пучка дейтерия, NBI (Neutral Beam Injection), мощностью 0.5 МВт (P_{NBI}) с энергией частиц около 28 кэВ и в базовом омическом разряде.

Следует отметить, что при увеличении зазора плазма–стенка улучшается удержание быстрых ионов: во-первых, за счет формирования более тесной магнитной конфигурации, в результате чего орбиты быстрых ионов сдвигаются внутрь плазмы, а потери быстрых частиц с первой орбиты и на перезарядку уменьшаются; во-вторых, из-за изменения профиля плотности, который сжимается к магнитной оси, вследствие чего потери быстрых частиц еще более сокращаются [19]. Однако чем больше зазор плазма–стенка, тем менее устойчивым и меньшим по длительности становится разряд, поскольку плазменный шнур прижимается к центральному столбу. В итоге, принимая во внимания все изложенные выше соображения и результаты вариации смещения плазменного шнура вдоль большого радиуса токамака, оптимальным значением ΔR было выбрано –2 см. Все последующие эксперименты проводили при таком смещении плазменного шнура.

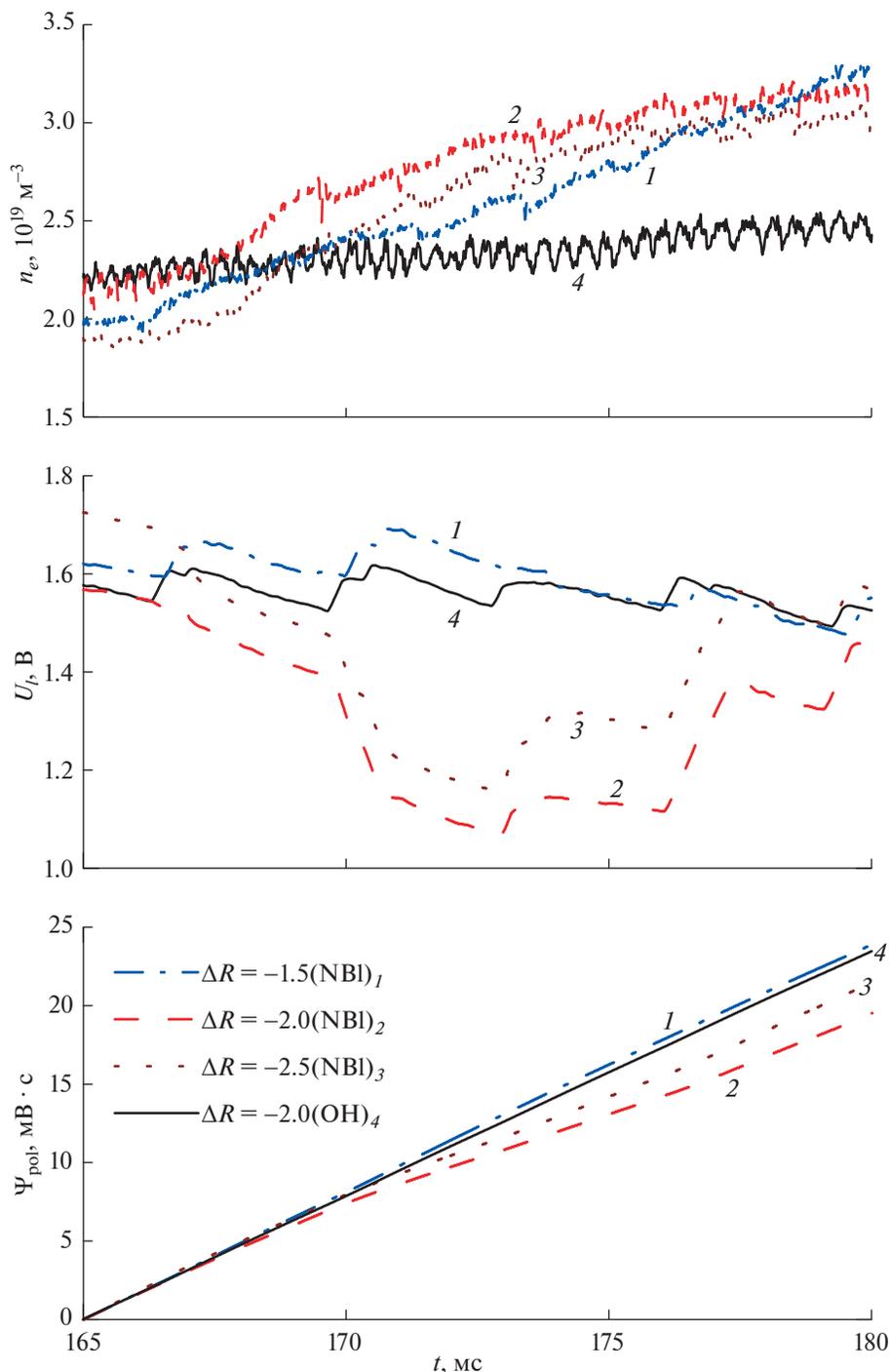


Рис. 2. Временная эволюция плотности плазмы, напряжения на обходе и расхода полоидального магнитного потока в разрядах с NBI ($P_{\text{NBI}} = 0.5$ МВт) № 34166 ($\Delta R = -1.5$ см, штрихпунктирная линия), № 34167 ($\Delta R = -2$ см, штриховая линия), № 34169 ($\Delta R = -2.5$ см, пунктир) и в базовом омическом разряде № 34173 ($\Delta R = -2$ см, сплошная линия).

Были проведены серии экспериментов во всевозможных вариантах изотопного состава (водород, дейтерий) плазмы и инжектируемого пучка и в диапазоне плотностей плазмы n_e от 1.5×10^{19} до $4.5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Основным результатом этих экспериментов — получение заметного и воспроизводимого провала напряжения на обходе плазмы (до

0.5 В) при инжекции как водородного, так и дейтериевого пучков в дейтериевую и водородную плазму при $I_p = 0.13\text{--}0.20$ МА. На рис. 3 изображены профили электронной температуры и плотности дейтериевой плазмы с $I_p = 170$ кА при инжекции водородного пучка мощностью 0.5 МВт с энергией частиц около 28 кэВ в разрядах с разной

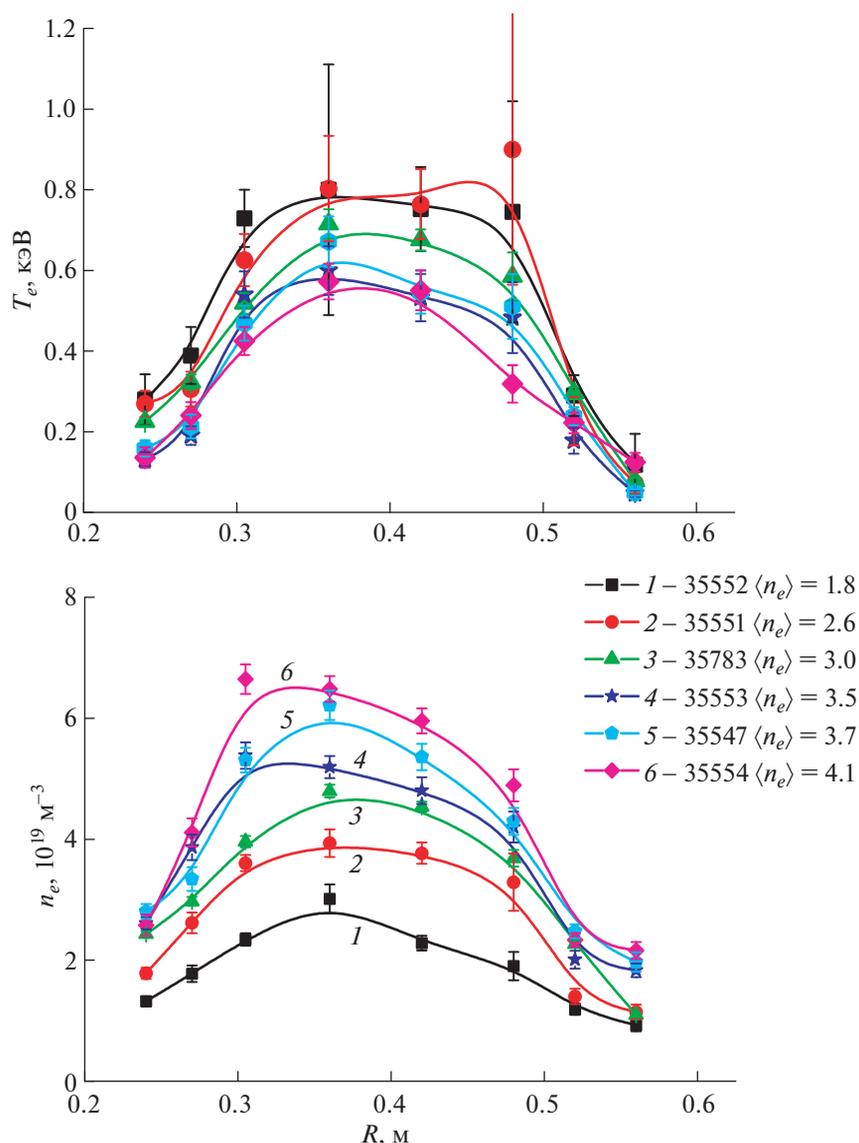


Рис. 3. Профили электронной температуры и плотности дейтериевой плазмы с $I_p = 170$ кА при инъекции водородного пучка мощностью 0.5 МВт в разрядах с различной плотностью.

плотностью в момент наибольшего провала напряжения на обходе плазмы.

Приведенные данные показывают, что с ростом плотности плазмы падает электронная температура, а для увеличения эффективности генерации тока, как известно, необходима высокая T_e и низкая плотность плазмы. Однако сочетание высокой температуры и низкой плотности плазмы приводит к значительным потерям быстрых частиц на пролет, следовательно, нужно искать оптимум в соотношении этих величин. С точки зрения уменьшения потерь быстрых частиц предпочтительнее выглядит инъекция водородного пучка, поскольку при одинаковых энергиях лучше удерживается именно водородный пучок, а не дейтериевый. Это подтверждают данные, пред-

ставленные на рис. 4, на котором дана зависимость прямых потерь быстрых частиц от средней электронной плотности дейтериевой плазмы при инъекции в нее водородного и дейтериевого пучков с энергией 28 кэВ [20].

На основе полученных экспериментальных данных о поведении напряжения на обходе плазмы и профилей температуры и плотности, а также результатов моделирования потерь быстрых частиц нами сделан вывод о том, что оптимальная средняя плотность плазмы, при которой пучком генерируется максимальный ток, составляет от 2×10^{19} до $3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. При плотности плазмы ниже оптимальной время термализации быстрых ионов увеличивается, однако пагубное влияние оказывают возрастающие потери энергичных ча-

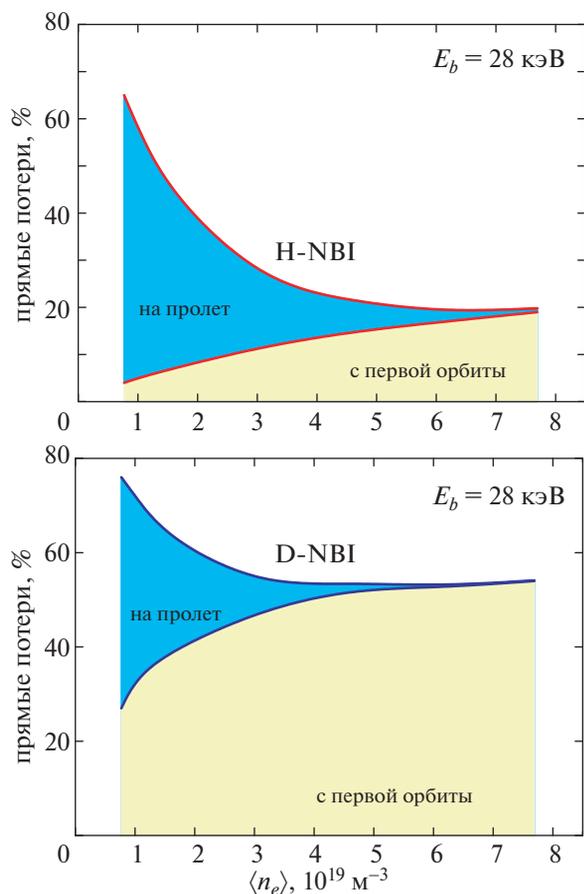


Рис. 4. Зависимость прямых потерь быстрых частиц от средней электронной плотности дейтериевой плазмы при инъекции в нее водородного и дейтериевого пучков с энергией 28 кэВ.

стиц. При плотности плазмы выше оптимальной сильно снижается время термализации быстрых ионов, в результате чего большая часть вложенной мощности инъекции идет на нагрев плазмы, и параллельно уменьшается эффективность генерации тока.

Поскольку на напряжение на обходе, помимо тока увлечения (I_{NBCD}), могут влиять изменения профиля электронной температуры T_e (так как от него зависит электропроводность плазмы) и профиля давления плазмы (так как он влияет на самогенерируемый плазмой бутстрэп-ток I_{BS}), задача расчета значений I_{NBCD} и I_{BS} становится многопараметрической и требует использования численных кодов. Для анализа экспериментальных данных построена модель на основе транспортно-кода ASTRA, позволяющая рассчитывать значения увлекаемого пучком тока и бутстрэп-тока. Входными параметрами для расчета являлись измеряемые в эксперименте ток плазмы, напряжение на обходе, ионная температура, временная вариация профилей электронной температуры и плотности, мощность излучения

плазмы, нейтронный выход, параметры пучка нейтральных частиц и геометрия инъекции. Кроме того, для расчета магнитной конфигурации при моделировании использовались данные о форме последней замкнутой магнитной поверхности, полученные с помощью магнитной реконструкции с использованием кода EFIT. Проводимость плазмы принимали неоклассической и рассчитывали с помощью модуля NCLASS [21], как и бутстрэп-ток, а поглощение пучка атомов – с помощью модуля NBI. Прямые потери частиц пучка учитывали введением поправочного коэффициента на вводимую мощность, поскольку в модуле NBI используется приближение “ведущего центра”, вследствие чего при расчетах поглощенной мощности в сферических токамаках значение потерь быстрых частиц занижается. В сферических токамаках из-за относительной малости удерживающего плазму магнитного поля быстрые частицы имеют широкие орбиты, сопоставимые по величине с малым радиусом установки. При этом возникают дополнительные потери быстрых частиц (не учитываемые в приближении “ведущего центра”), которые рассчитывали с помощью трехмерного алгоритма, отслеживающего траектории частиц [19], по данным, полученным в экспериментах по измерению энергетических спектров атомов перезарядки. Таким образом, проводили коррекцию вводимой мощности на основе экспериментальных данных NPA.

На основе построенной модели проведены расчеты значений безындукционных токов в зависимости от плотности плазмы при инъекции водородного пучка (28 кэВ, 0.5 МВт) в дейтериевую плазму с $I_p = 170$ кА (рис. 5); профили электронной температуры и плотности плазмы для рассматриваемых разрядов изображены на рис. 3.

Результаты расчетов подтверждают предположение о том, что оптимальная плотность для генерации тока в сферическом токамаке Глобус-М составляет от 2×10^{19} до $3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Они также свидетельствуют, что увлекаемый пучком ток снижается с ростом плотности плазмы из-за уменьшения времени термализации и соответствующего снижения эффективности генерации тока, в то время как бутстрэп-ток увеличивается приблизительно на ту же величину, поскольку в разрядах с инъекцией пучка атомов заметно возрастает энергозапас плазмы с увеличением ее плотности [22], что вызывает в свою очередь подъем профиля давления плазмы. В итоге полная доля безындукционных токов в проведенных экспериментах составляла 17–25%, а доля мощности инъекции, которая поглощалась плазмой, не превышала 30% (принимая во внимание прямые потери быстрых частиц и потери на перезарядку при замедлении).

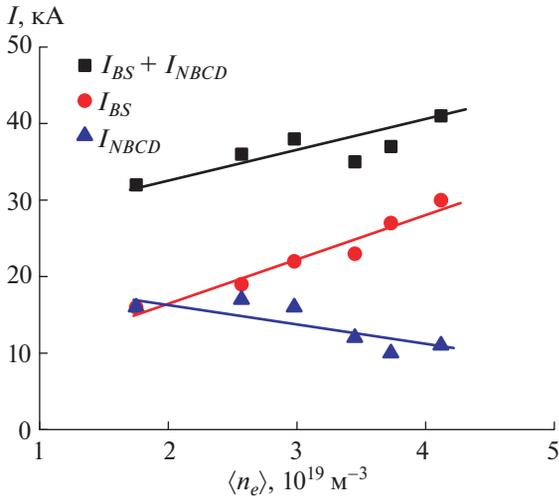


Рис. 5. Зависимость безындукционных токов дейтериевой плазмы с $I_p = 170$ кА от ее плотности (I_{NBCD} – ток, генерируемый пучком атомов; I_{BS} – бутстрэп-ток) при инжекции водородного пучка. $P_{NBI} = 0.5$ МВт.

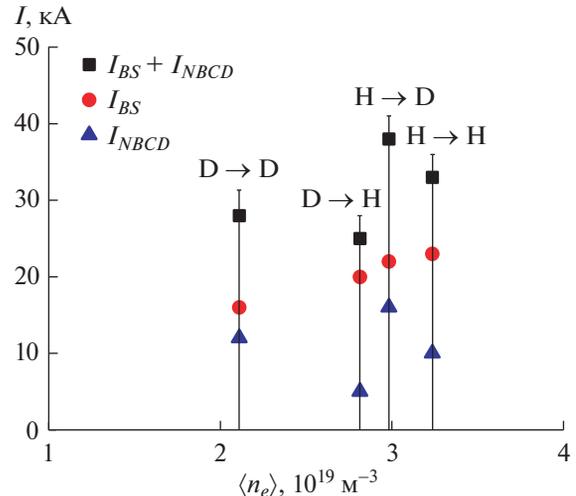


Рис. 6. Зависимость безындукционных токов плазмы от ее плотности при различных изотопных сочетаниях пучка $P_{NBI} = 0.5$ МВт и плазмы с $I_p = 170$ кА (I_{NBCD} – ток, генерируемый пучком атомов; I_{BS} – бутстрэп-ток).

Было проведено сравнение эффективности генерации безындукционных токов при инжекции водородного или дейтериевого пучка в водородную или дейтериевую плазму. На рис. 6 представлена зависимость безындукционных токов плазмы от ее плотности для всех изотопных сочетаний пучка и плазмы. Полученные результаты подтверждают вывод, что бутстрэп-ток увеличивается с ростом плотности плазмы; эффективность генерации тока увлечения водородным пучком выше, чем дейтериевым, что объясняется значительно более высоким уровнем прямых потерь быстрых частиц (напрелет и “с первой орбиты”) при инжекции дейтериевого пучка, как уже отмечалось выше. В токамаке Глобус-М с относительно низким значением тороидального магнитного поля прямые потери быстрых частиц могут достигать 70% для низких плотностей плазмы (см. рис. 4) [23].

Была выполнена серия экспериментов с нейтральной инжекцией, направленная на исследование влияния смещения плазменного шнура в вертикальном направлении ($\Delta Z = \pm 0.08$ м) на генерацию токов увлечения. Так называемая внеосевая инжекция позволяет снизить долю частиц пучка, захваченных на запертые орбиты, тем самым повысить эффективность генерации токов увлечения, поскольку запертые частицы не генерируют тороидального тока: чем их больше, тем меньше увлекаемый пучком ток. Захват ионов на запертые орбиты в первую очередь определяется углом наклона силовых линий магнитного поля к направлению инжекции пучка (питч-угол), особенно в сферическом токамаке, в котором полоидальное магнитное поле сопоставимо по величине

не с тороидальным. Поэтому в экспериментах изменяли питч-угол, варьируя вертикальное и горизонтальное положение плазмы относительно пучка. Минимальную долю частиц, захваченных на запертые орбиты, а следовательно, увеличение безындукционного тока предполагалось получить при направлении пучка, максимально близком к направлению силовых линий магнитного поля. При этом в условиях токамака Глобус-М при одинаковом направлении тороидального магнитного поля, тока плазмы и атомного пучка плазма должна быть сдвинута вниз относительно экваториальной плоскости тора. Типичные положения плазмы (полученные с помощью кода EFIT) и пучка атомов в этих экспериментах показаны на рис. 7.

Для того чтобы обеспечить максимальный вертикальный сдвиг плазменного шнура при сохранении идентичных параметров мишени, ток разряда был снижен до 130 кА. На рис. 8 представлены осциллограммы основных сигналов для дейтериевых разрядов, обладающих разным вертикальным смещением, при инжекции водородного пучка (28 кэВ, 0.5 МВт).

Полученные данные были обработаны с помощью описанной выше модели, результаты расчетов сведены в таблицу 1.

Расчеты показали, что увлекаемый пучком ток составляет примерно 13–14 кА для всех разрядов, следовательно, эффективность генерации токов увлечения практически не изменяется. Тем не менее расход полоидального магнитного потока оказался минимальным для несдвинутого положения плазменного шнура. Такое поведение

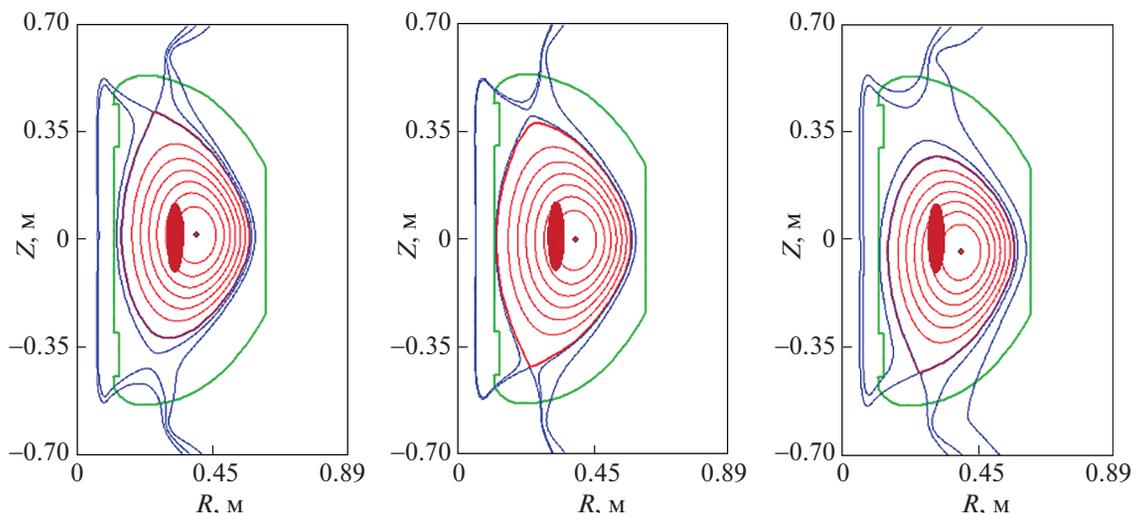


Рис. 7. Магнитные конфигурации плазмы при ее различном вертикальном смещении (слева направо $\Delta Z = +5$ см, -2 см, -7 см). Закрашенный эллипс – соответствующее сечение инжектируемого пучка; точка – магнитная ось плазмы.

можно объяснить некоторым снижением электронной температуры и ростом потока примесей внутрь плазмы в случае ее смещения в вертикальном направлении. Однако величина вертикального смещения плазменного шнура была, по крайней мере, в два раза меньше, чем размер нейтрального пучка в вертикальном направлении, соответственно эффект от смещения был слабым.

В последней серии экспериментов на токамаке Глобус-М в разрядах с нейтральной инжекцией исследовано влияние увеличения тороидального магнитного поля B_t на эффективность генерации токов увлечения. Водородный пучок мощностью 1 МВт с энергией частиц 28 кэВ (источник ИПМ-1) инжектировали в дейтериевую плазму с током 170 кА в квазистационарной фазе разряда при разных величинах тороидального магнитного поля. На рис. 9 представлен расход полоидального магнитного потока в разрядах с инжекцией пучка атомов в сравнении с омическим разрядом. Приведенные данные показывают, что увеличение тороидального магнитного поля на 25% (с 0.4 до 0.5 Тл) приводит к меньшему расходу вольт-секундной емкости индуктора (до 10%), поскольку часть тороидального тока замещается бутстрэп-током и током, генерируемым пучком.

С ростом тороидального магнитного поля уменьшаются потери быстрых частиц, рожденных вследствие инжекции атомов, и улучшается удержание быстрых ионов в плазме, а также возрастает время удержания энергии плазмы и электронная температура, следовательно, время термализации быстрых ионов увеличивается и все это в комплексе приводит к росту эффективности генерации тока пучком атомов. В то же время с ростом B_t увеличивается энергозапас плазмы и, следовательно, бутстрэп-ток. Необходимо отметить, что рекордная доля безындукционных токов была получена в режиме с ранней, в фазе подъема тока, инжекцией дейтериевого пучка (28 кэВ, 0.75 МВт) в дейтериевую плазму с током 200 кА. На рис. 10 представлены основные параметры этого разряда, вместе с минимальным значением коэффициента запаса устойчивости и долями безындукционных токов. В разряде практически сразу после включения пучка (130 мс) формируется обращенный профиль коэффициента запаса устойчивости, что приводит к появлению внутреннего транспортного барьера для частиц в области отрицательного магнитного шира в центре плазмы [24], вследствие чего пикируется профиль концентрации плазмы, который вместе с профилем температуры приведен на рис. 11, и значительно возрастает бутстрэп-ток. Длительность су-

Таблица 1. Результаты моделирования дейтериевых разрядов с инжекцией водородного пучка при различном вертикальном смещении плазмы

Номер разряда	ΔZ , см	I_p , кА	I_{BS} , кА	I_{NBCD} , кА	$\langle n_e \rangle$, 10^{19} м^{-3}	$\langle T_e \rangle$, эВ	$\langle T_i \rangle$, эВ	Z_{eff}
35793	5	131	18	14	2.00	176	122	2.72
35785	-2	138	26	13	2.26	216	149	2.86
35789	-7	134	21	14	2.43	198	137	2.80

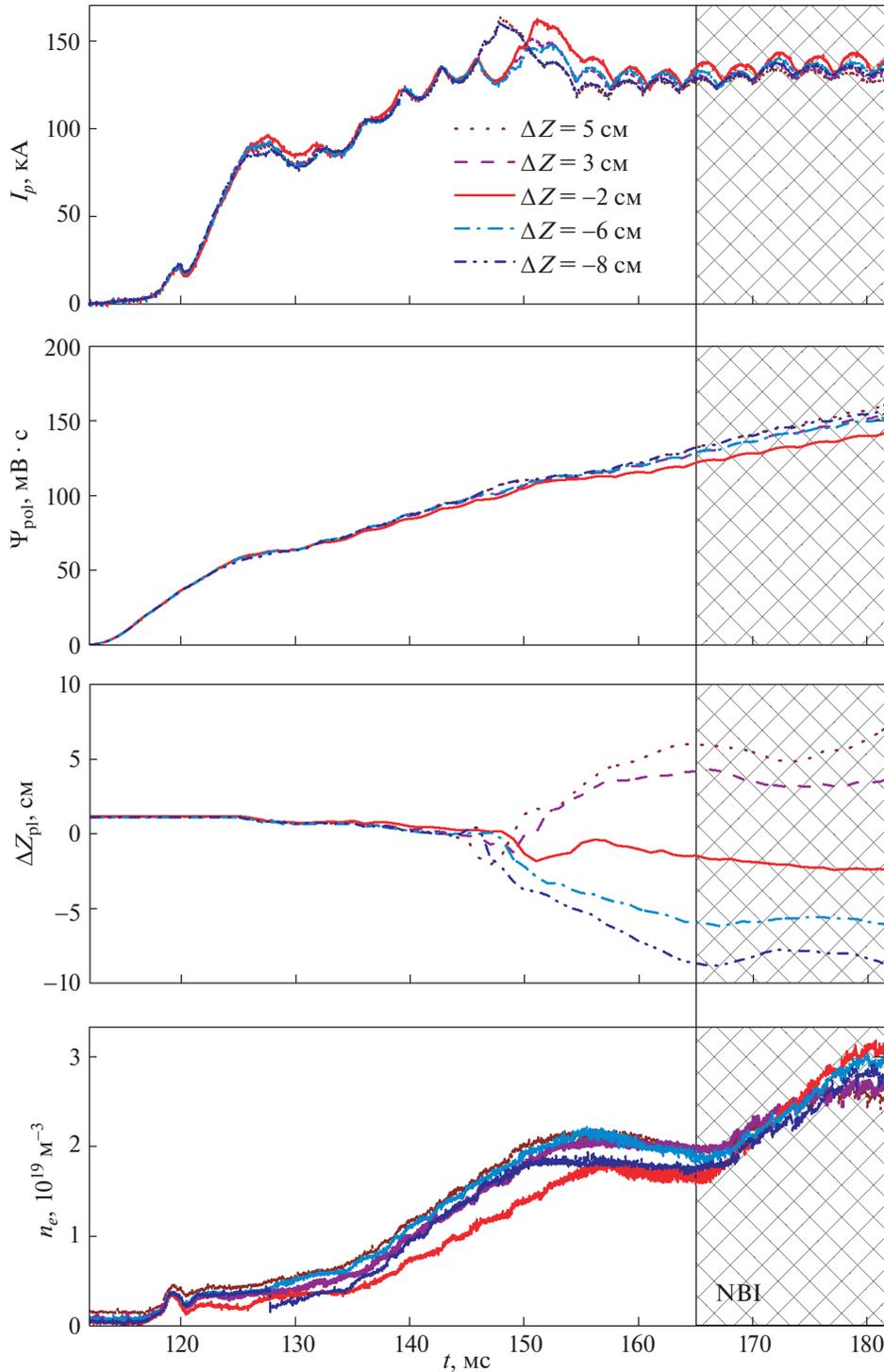


Рис. 8. Осциллограммы тока плазмы, расхода полоидального магнитного потока, вертикального смещения плазмы и электронной плотности для дейтериевых разрядов при инжекции водородного пучка.

существования такого режима определяется скоростью диффузии тока: когда минимальное значение коэффициента запаса устойчивости в плазменном шнуре приближается к единице, происходит развитие МГД-неустойчивости $m = 1/n = 1$ с последующим внутренним срывом.

Схожая картина наблюдалась при исследовании переходных продвинутых режимов удержания на токамаке MAST [25]. При $I_p = 200$ кА и $B_t = 0.4$ Тл малый срыв происходил на 150 мс разряда [24], в то время как увеличение тороидального магнитного поля до 0.5 Тл при фиксированном токе

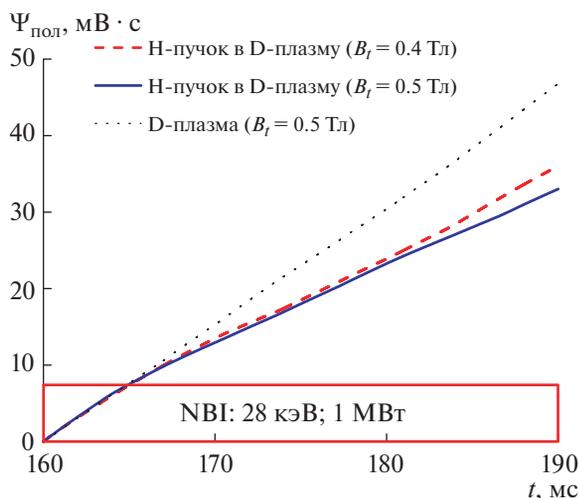


Рис. 9. Расход вольт-секундной емкости центрального соленоида для омического разряда № 36902 ($B_t = 0.5$ Тл, пунктир) и разрядов с инжекцией пучка № 36932 ($B_t = 0.5$ Тл, сплошная линия) и № 37017 ($B_t = 0.4$ Тл, штриховая линия).

плазмы 200 кА позволило удлинить разряд на 10 мс вплоть до окончания работы инжектора. В результате бутстрэп-ток составил 50 кА (около 25% от полного тока плазмы), а генерируемый пучком атомов ток — 15 кА (всего около 7% от полного тока плазмы) из-за низкой доли поглощенной мощности пучка и относительно невысокой температуры электронов.

В токамаке Глобус-М2 тороидальное магнитное поле и ток плазмы будут увеличены до 1 Тл и 500 кА [26] соответственно, а значит, возрастет электронная температура плазмы, уменьшатся потери быстрых частиц, рожденных вследствие инжекции атомов, и улучшится удержание быстрых ионов в плазме, в результате чего увеличится эффективность генерации тока пучком атомов. В итоге мы ожидаем существенный рост эффективности генерации токов увлечения на установке Глобус-М2 с усиленным магнитным полем и увеличенной мощностью нейтральной инжекции после модернизации системы инжекционного нагрева плазмы [27].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены всесторонние исследования генерации безындукционных токов в компактном сферическом токамаке Глобус-М при инжекции пучка высокоэнергичных атомов в широком диапазоне параметров плазмы. Для обработки экспериментальных данных построена модель на основе кода ASTRA, позволяющая рассчитывать величины тока увлечения и бутстрэп-тока. Проведенные расчеты подтвердили, что при инжекции как водородного, так и дейтериевого пучков

в дейтериевую и водородную плазму имеет место эффективная генерация токов увлечения.

Расчеты зависимости безындукционных токов от плотности плазмы при инжекции водородного пучка в дейтериевую плазму свидетельствуют о том, что увлекаемый пучком ток снижается с ростом плотности плазмы, тогда как бутстрэп-ток увеличивается приблизительно на ту же величину. Полная доля безындукционных токов в рассматриваемых разрядах составляла 17–25%, а доля мощности инжекции, которая поглощалась плазмой, не превышала 30%. Результаты проведенных расчетов совместно с экспериментальными данными о поведении напряжения на обходе плазмы и профилей температуры и плотности, а также результаты моделирования потерь быстрых частиц позволяют сделать вывод о том, что оптимальная средняя плотность плазмы, при которой пучком генерируется максимальный ток, составляет от 2×10^{19} до 3×10^{19} м⁻³.

Сравнение эффективности генерации безындукционных токов при инжекции водородного или дейтериевого пучка в H- или D-плазму показало, что бутстрэп-ток увеличивается с ростом плотности плазмы; эффективность генерации тока увлечения водородным пучком выше, чем дейтериевым, что можно объяснить значительно более высоким уровнем прямых потерь быстрых частиц (напролет и “с первой орбиты”) при инжекции дейтериевого пучка.

Анализ результатов экспериментов по внеосевой инжекции показал, что для всех разрядов увлекаемый пучком ток составляет примерно 13–14 кА, следовательно, эффективность генерации токов увлечения в условиях токамака Глобус-М практически не зависит от вертикального смещения плазмы. Тем не менее расход полоидального магнитного потока был минимален для несдвинутого положения плазменного шнура. Такое поведение можно объяснить ростом потока примесей внутрь плазмы в случае ее смещения в вертикальном направлении и некоторым снижением электронной температуры. Однако величина вертикального смещения плазменного шнура была, по крайней мере, в два раза меньше, чем размер нейтрального пучка в вертикальном направлении, соответственно эффект от смещения был слабый.

На основе изучения влияния тороидального магнитного поля на расход полоидального магнитного потока в разрядах с инжекцией пучка атомов, показано, что увеличение B_t на 25% (с 0.4 до 0.5 Тл) приводит к меньшему расходу вольт-секундной емкости индуктора (до 10%), поскольку часть возбуждаемого тороидального тока замещается бутстрэп-током и током, генерируемым пучком. В режиме с ранней инжекцией пучка в плазму, при которой появляется внутрен-

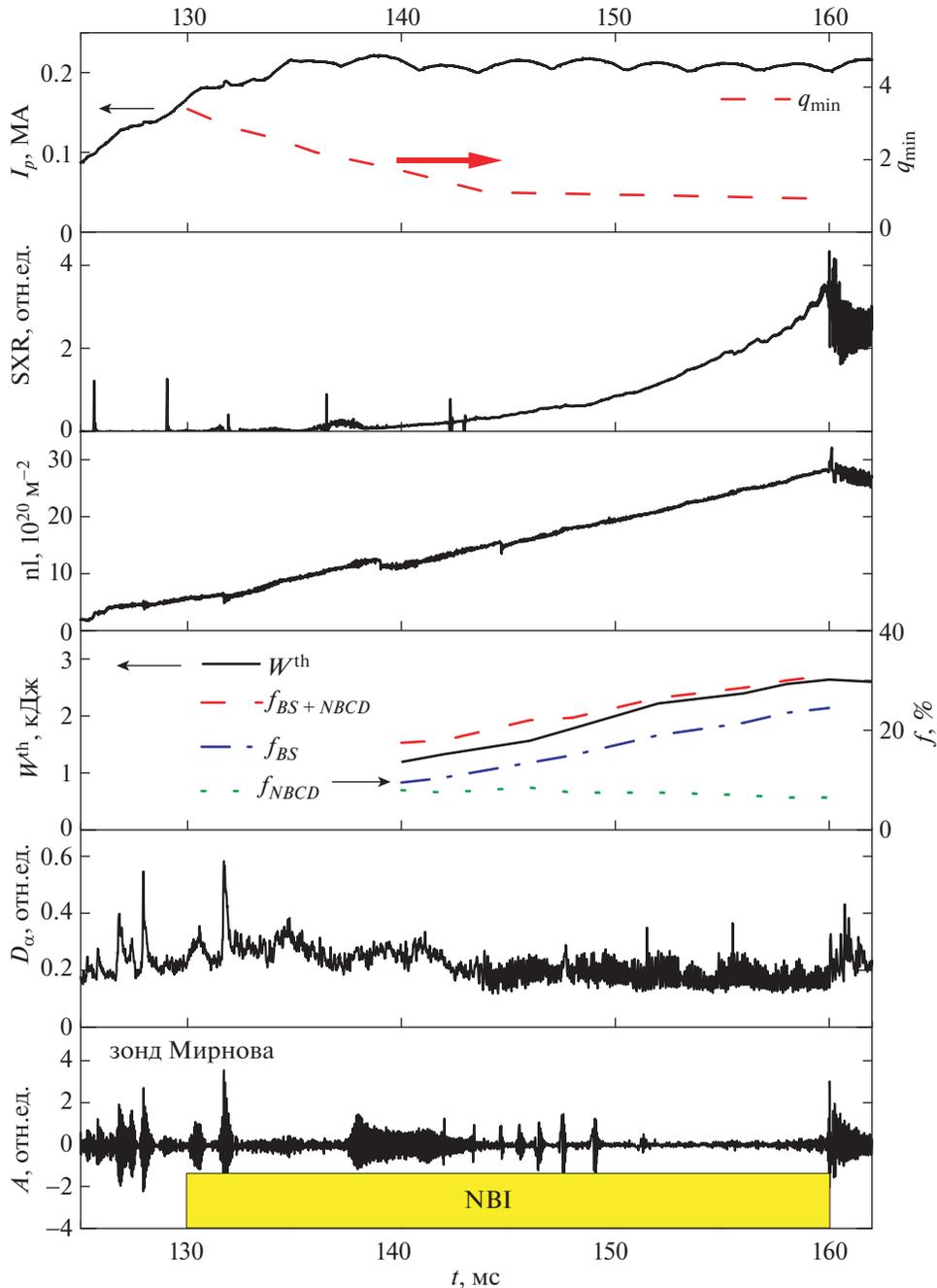


Рис. 10. Осциллограммы тока плазмы, минимального значения коэффициента запаса устойчивости внутри плазменного шнура, сигнала мягкого рентгеновского излучения, среднехордовой плотности, теплового энергозапаса плазмы, долей безындукционных токов, свечения водородной линии D_α и сигнала с магнитного зонда.

ний транспортный барьер для частиц в области отрицательного магнитного шира в центре плазмы, получена рекордная доля безындукционных токов (около 32%).

Исследования возбуждения и поддержания безындукционного тока, генерируемого путем инжекции пучка высокоэнергичных атомов, в сферическом токамаке необходимы для выбора и оптимизации режимов работы будущих компакт-

ных источников нейтронов. В экспериментах, представленных в настоящей работе, генерация безындукционных токов посредством нейтральной инжекции является нестационарной, плазменный разряд, как правило, заканчивается внутренним срывом, поэтому рассмотрение сферического токамака в качестве стационарного прототипа ТИН требует проведения дополнительных исследований. В ближайшем будущем они будут связаны с модернизацией токамака

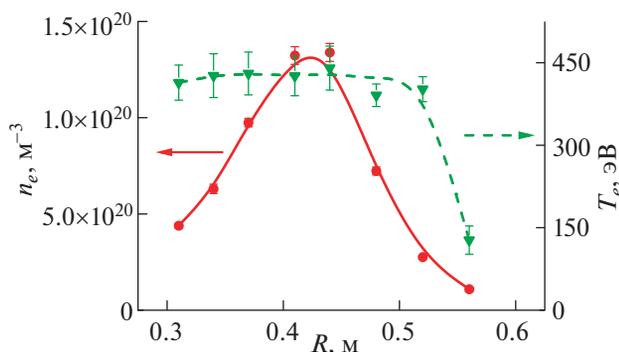


Рис. 11. Пространственные распределения концентрации (по левой оси, сплошная линия) и температуры электронов (по правой оси, пунктирная линия) на 159 мс разряда, осциллограммы которого изображены на рис. 10.

Глобус-М. В установке Глобус-М2 магнитное поле и ток плазмы будут увеличены в 2.5 раза, а также будет установлен новый инжектор атомов, что позволит проводить эксперименты в условиях, приближенных к условиям работы реального источника нейтронов.

Авторы благодарят сотрудников установки Глобус-М за помощь в подготовке настоящей работы, организации и проведении экспериментов, а также за полезные советы при обсуждении результатов. Рутинные измерения параметров плазмы выполнены в рамках государственного задания в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, измерения параметров инжектора атомов поддерживаются программой президиума РАН. Исследование генерации безындукционных токов в режимах с ранней инжекцией пучка атомов выполнено при поддержке Российского научного фонда № 17-72-20076.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shimada M., Campbell D.J., Mukhovatov V., Fujiwara M., Kirneva N., Lackner K., Nagami M., Pustovitov V.D., Uckan N., Wesley J., Asakura N., Costley A.E., Donn'e A.J.H., Doyle E.J., Fasoli A., Gormezano C., Gribov Y., Gruber O., Hender T.C., Houlberg W., Ide S., Kamada Y., Leonard A., Lipschultz B., Loarte A., Miyamoto K., Mukhovatov V., Osborne T.H., Polevoi A., Sips A.C.C. // Nucl. Fusion. 2007. V. 47. S1.
2. Menard J., Boyer M., Brown T., Canik J., Covele B., Angelo C.D., Davis A., Gerhardt S., Kaye S., Kessel C., Kotschenreuther M., Mahajan S. // Proc. IAEA 25th Fusion Energy Conf., St. Petersburg, Russia, 2014. LLNL-PROC-661899.
3. Kuteev B.V., Azizov E.A., Bykov A.S., Dnestrovsky A.Y., Dokuka V.N., Gladush G.G., Golikov A.A., Goncharov P.R., Gryaznevich M., Gurevich M.I., Ivanov A.A., Khairutdinov R.R., Khripunov V.I., Kingham D., Klishchenko A.V., Kurnaev V.A., Lukash V.E., Medvedev S.Y., Savrukhin P.V., Sergeev V.Y., Shpansky Y.S., Sykes A., Voss G., Zhirkin A.V. // Nucl. Fusion. 2011. V. 51. 073013.
4. Menard J.E., Brown T., El-Guebaly L., Boyer M., Canik J., Colling B., Raman R., Wang Z., Zhai Y., Buxton P., Covele B., D'Angelo C., Davis A., Gerhardt S., Gryaznevich M., Harb M., Hender T.C., Kaye S., Kingham D., Kotschenreuther M., Mahajan S., Maingi R., Marriott E., Meier E.T., Mynsberge L., Neumeyer C., Ono M., Park J.-K., Sabbagh S.A., Soukhanovskii V., Valanju P., Woolley R. // Nucl. Fusion. 2016. V. 56. 106023.
5. Щеголев П.Б., Бахарев Н.Н., Гусев В.К., Курские Г.С., Минаев В.Б., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В. // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 9. С. 62. [Shchegolev P.B., Bakharev N.N., Gusev V.K., Kurskiev G.S., Minaev V.B., Patrov M.I., Petrov Yu.V. and Sakharov N. V. // Technical Physics, **60**, No. 9, 1321 (2015)].
6. Gormezano C., Sips A.C.C., Luce T.C., Ide S., Becoulet A., Litaudon X., Isayama A., Hobirk J., Wade M.R., Oikawa T., Prater R., Zvonkov A., Lloyd B., Suzuki T., Barbato E., Bonoli P., Phillips C.K., Vdovin V., Joffrin E., Casper T., Ferron J., Mazon D., Moreau D., Bundy R., Kessel C., Fukuyama A., Hayashi N., Imbeaux F., Murakami M., Polevoi A.R., St John H.E. // Nucl. Fusion. 2007. V. 47. S285.
7. Suzuki T., Akers R.J., Gates D.A., Günter S., Heidbrink W.W., Hobirk J., Luce T.C., Murakami M., Park J.M., Turnyanskiy M. and the ITPA 'Integrated Operation Scenarios' group members and experts // Nucl. Fusion. 2011. V. 51. 083020.
8. Murakami M., Park J.M., Petty C.C., Luce T.C., Heidbrink W.W., Osborne T.H., Prater R., Wade M.R., Anderson P.M., Austin M.E., Brooks N.H., Budny R.V., Challis C.D., DeBoo J.C., deGrassie J.S., Ferron J.R., Gohil P., Hobirk J., Holcomb C.T., Hollmann E.M., Hong R.M., Hyatt A.W., Lohr J., Lanctot M.J., Makowski M.A., McCune D.C., Politzer P.A., Scoville J.T., St John H.E., Suzuki T., Taylor T.S., West W.P., Unterberg E.A., Van Zeeland M.A., Yu J.H. // Nucl. Fusion. 2009. V. 49. 065031.
9. Turnyanskiy M., Keeling D.L., Akers R., Cunningham J.G., Meyer H., Pinches S.D. // Proc. 22nd IAEA Fusion Energy Conf., Geneva, Switzerland, 2008. EX/P6-26.
10. Гусев В.К., Голант В.Е., Гусаков Е.З., Дьяченко В.В., Ирзак М.А., Минаев В.Б., Мухин Е.Е., Новохацкий А.Н., Подушиņикова К.А., Раздобарин Г.Т., Сахаров Н.В., Трегубова Е.Н., Узлов В.С., Щербинин О.Н., Беляков В.А., Кавин А.А., Косцов Ю.А., Кузьмин Е.Г., Соϊкин В.Ф., Кузнецов Е.А., Ягнов В.А. // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 9. С. 58. [Gusev V.K., Golant V.E., Gusakov E.Z., D'yachenko V.V., Irzak M.A., Minaev V.B., Mukhin E.E., Novokhatskii A.N., Podushnikova K.A., Razdobarin G.T., Sakharov N.V., Tregubova E.N., Uzlov V.S., Shcherbinin O.N., Belyakov V.A., Kavin A.A., Kostsov Yu.A., Kuz'min E.G., Soikin V.F., Kuznetsov E.A. and Yagnov V.A. // Technical Physics, **44**, 1054 (1999)].
11. Гусев В.К., Деч А.В., Есипов Л.А., Минаев В.Б., Барсуков А.Г., Игонькина Г.Б., Кузнецов В.В., Панасенков А.А., Соколов М.М., Тилинин Г.Н., Лупин А.В., Марков В.К. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 9. С. 28. [Gusev V.K., Dech A.V., Esipov L.A., Minaev V.B., Barsukov A.G., Igon'kina G.B., Kuznetsov V.V., Panasenkov A.A., Sokolov M.M., Tilinin G.N., Lupin A.V., Markov V.K. // Technical Physics, **52**, 1127 (2007)].
12. Щеголев П.Б., Минаев В.Б., Мирошников И.В. // НТВ СПбГПУ Физ.-мат. науки. 2012. № 4. С. 79.
13. Курские Г.С., Толстяков С.Ю., Березуцкий А.А., Гусев В.К., Кочергин М.М., Минаев В.Б., Мухин Е.Е.,

- Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Семёнов В.В., Чернаков П.В. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2012. Вып. 2. С. 81.
14. Бахареv Н.Н., Мельник А.Д., Минаев В.Б., Петров Ю.В., Чернышев Ф.В. // НТВ СПбГПУ Физ.-мат. науки. 2012. № 4. С. 74.
 15. Avdeeva G.F., Miroshnikov I.V., Bakharev N.N., Kurskiev G.S., Patrov M.I., Sergeev V.Yu., Shchegolev P.B. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 666. 012002.
 16. Диагностика плазмы / Под ред. Р. Хаддлстоуна и С. Леонарда. М.: МИР, 1967.
 17. Гусев В.К., Бендер С.Е., Деч А.В., Косцов Ю.А., Левин Р.Г., Минеев А.Б., Сахаров Н.В. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 8. С. 25. [Gusev V.K., Bender S.E., Dech A.V., Kostsov Yu.A., Levin R.G., Mineev A.B., Sakharov N.V. // Technical Physics, **51**, 987 (2006)]
 18. Pereverzev G.V., Yushmanov P.N. // ASTRA Automated System for TRansport Analysis / Preprint IPP 5/98. Garching: IPP, 2002.
 19. Bakharev N.N., Chernyshev F.V., Goncharov P.R., Gusev V.K., Ibyaminova A.D., Kornev V.A., Kurskiev G.S., Melnik A.D., Minaev V.B., Mironov M.I., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Shchegolev P.B., Tolstyakov S.Yu., Zadviitskiy G.V. // Nucl. Fusion. 2015. V. 55. 043023.
 20. Shchegolev P.B., Minaev V.B., Telnova A.Yu., Bakharev N.N., Gusev V.K., Kurskiev G.S., Miroshnikov I.V., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Tolstyakov S.Yu. // Proc. 43rd EPS Conf. on Plasma Phys., Leuven, Belgium, 2016. V. 40A. P1.065. (<http://ocs.ciemat.es/EPS2016PAP/pdf/P1.065.pdf>)
 21. Houlberg W.A., Shaing K.C., Hirshman S.P., Zarnstorff M.C. // Phys. Plasmas. 1997. V. 4. P. 3230.
 22. Kurskiev G.S., Gusev V.K., Sakharov N.V., Bakharev N.N., Ibyaminova A.D., Shchegolev P.B., Avdeeva G.F., Kiselev E.O., Minaev V.B., Mukhin E.E., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Telnova A.Yu., Tolstyakov S.Yu. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2017. V. 59. 045010.
 23. Gusev V.K., Azizov E.A., Alekseev A.B., Arneman A.F., Bakharev N.N., Belyakov V.A., Bender S.E., Bondarchuk E.N., Bulanin V.V., Bykov A.S., Chernyshev F.V., Chugunov I.N., Dyachenko V.V., Filatov O.G., Ibyaminova A.D., Irzak M.A., Kavin A.A., Kurskiev G.S., Khitrov S.A., Khromov N.A., Kornev V.A., Krasnov S.V., Kuznetsov E.A., Labusov A.N., Larionov M.M., Lobanov K.M., Malkov A.A., Melnik A.D., Minaev V.B., Mineev A.B., Mironov M.I., Miroshnikov I.V., Novokhatsky A.N., Ovsyannikov A.D., Panasenkov A.A., Patrov M.I., Petrov M.P., Petrov Yu.V., Rozhansky V.A., Rozhdestvensky V.V., Saveliev A.N., Sakharov N.V., Shchegolev P.B., Shcherbinin O.N., Senichenkov I.Yu., Sergeev V.Yu., Shevelev A.E., Stepanov A.Yu., Tanchuk V.N., Tolstyako S.Yu., Varfolomeev V.I., Voronin A.V., Wagner F., Yagnov V.A., Yashin A.Yu., Zhilin E.G. // Nucl. Fusion. 2013. V. 53. 093013.
 24. Курскиеv Г.С., Гусев В.К., Толстяков С.Ю., Березуцкий А.А., Буланин В.В., Варфоломеев В.И., Кочергин М.М., Минаев В.Б., Мухин Е.Е., Патров М.И., Петров А.В., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Семёнов В.В., Яшин А.Ю., Хромов Н.А. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 23. С. 82.
 25. Chapman I.T., Hua M.-D., Pinches S.D., Akers R.J., Field A.R., Graves J.P., Hastie R.J., Michael C.A. and the MAST Team // Nucl. Fusion. 2010. V. 50. 045007.
 26. Minaev V.B., Gusev V.K., Sakharov N.V., Varfolomeev V.I., Bakharev N.N., Belyakov V.A., Bondarchuk E.N., Brunkov P.N., Chernyshev F.V., Davydenko V.I., Dyachenko V.V., Kavin A.A., Khitrov S.A., Khromov N.A., Kiselev E.O., Konovalov A.N., Kornev V.A., Kurskiev G.S., Labusov A.N., Melnik A.D., Mineev A.B., Mironov M.I., Miroshnikov I.V., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Rozhansky V.A., Saveliev A.N., Senichenkov I.Yu., Shchegolev P.B., Shcherbinin O.N., Shikhovtsev I.V., Sladkomedova A.D., Solokha V.V., Tanchuk V.N., Telnova A.Yu., Tokarev V.A., Tolstyakov S.Yu., Zhilin E.G. // Nucl. Fusion. 2017. V. 57. 066047.
 27. Shchegolev P.B., Minaev V.B., Telnova A.Yu., Bakharev N.N., Goncharov P.R., Gusev V.K., Kurskiev G.S., Miroshnikov I.V., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Shikhovtsev I.V., Tolstyakov S.Yu. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 907. 012013.

Neutral Beam Current Drive in Globus-M Compact Spherical Tokamak

P. B. Shchegolev^{a,*}, V. B. Minaev^a, N. N. Bakharev^a, V. K. Gusev^a, E. O. Kiselev^a,
G. S. Kurskiev^a, M. I. Patrov^a, Yu. V. Petrov^a, and A. Yu. Tel'nova^a

^a Ioffe Institute, St. Petersburg, 194021 Russia

* e-mail: peter_shchegolev@mail.ioffe.ru

Abstract—The article presents research on neutral beam current drive in the Globus-M compact spherical tokamak. The experiments were performed in the plasma current range of 0.17–0.20 MA with a 0.4- or 0.5-T toroidal magnetic field. The injection impact parameter was 33 cm. The variable parameters included the compositions of the plasma and heating beam (hydrogen, deuterium), plasma density, and vertical displacement of the plasma column. An increase in the plasma current and the simultaneous drop in the loop voltage were used to determine the neutral beam current drive. The injection of a hydrogen/deuterium beam into deuterium or hydrogen plasma resulted in a significant and reproducible drop in the loop voltage (up to 0.5 V). In order to process the obtained data, the authors developed an ASTRA code-based model, which allows one to calculate the neutral beam-driven current and bootstrap current. The share of noninductive currents as a function of plasma density during the injection of a hydrogen beam (28 keV, 0.5 MW) into the deuterium plasma was calculated. The authors analyze the results of experiments on off-axis beam injection achieved by vertical displacement of the plasma column and the effect of increasing the toroidal magnetic field on the consumption of poloidal magnetic flux in discharges with atomic beam injection.