

Первые эксперименты по контр-инъекции атомов высокой энергии на токамаке Глобус-М

© Н.Н. Бахарев,¹ П.Р. Гончаров,² В.К. Гусев,¹ В.И. Давыденко,³ Г.В. Задвитский,⁴ Г.С. Курский,¹ А.Д. Мельник,¹ В.Б. Минаев,¹ М.И. Миронов,¹ М.И. Патров,¹ Ю.В. Петров,¹ Н.В. Сахаров,¹ А.Д. Сладкомедова,¹ А.Ю. Тельнова,¹ С.Ю. Толстяков,¹ Ф.В. Чернышев,¹ П.Б. Щеголев¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
194064 Санкт-Петербург, Россия

³ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия

⁴ 3IJL UMR 7198 CNRS - Université de Lorraine, BP 70239,
F-54506 Vandoeuvre-lès-Nancy, Cedex France
e-mail: bakharev@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 28 марта 2017 г.)

Впервые на токамаке Глобус-М проведены эксперименты по контр-инъекции атомов высокой энергии. Получен режим улучшенного удержания без неустойчивостей, локализованных на периферии. В то же время при контр-инъекции не обнаружено значительного роста ионной температуры и энергосодержания плазмы, что объясняется высоким уровнем потерь быстрых ионов. Увеличение тока плазмы и расстояния плазма–стенка не привело к повышению эффективности нагрева плазмы с помощью нейтральной инъекции, как это происходило в экспериментах с ко-инъекцией.

DOI: 10.21883/JTF.2017.12.45203.2273

Введение

Инъекция атомов высокой энергии по направлению тока плазмы (ко-инъекция) широко применяется на современных токамаках из-за низких потерь вводимой мощности и эффективной генерации токов увлечения. Тем не менее нейтральная инъекция (НИ) навстречу току плазмы (контр-инъекция) также представляет интерес, поскольку может быть использована для получения режима улучшенного удержания (Н-моды) без неустойчивостей, локализованных на периферии (ELM — edge localized mode), приводящих к импульсной нагрузке на элементы внутренних конструкций токамака и вызывающих их быструю эрозию [1]. В частности, контр-инъекция позволяет получить так называемый спокойный режим улучшенного удержания (quiescent Н-моду) [2], в котором отсутствуют неустойчивости типа ELM, не происходит накопления примесей, а Н-фактор выше, чем при применении ко-инъекции. Исследования также показали, что контр-инъекция обладает рядом других преимуществ, таких как пониженный порог по плотности при переходе в Н-моду. На токамаке Туман-3М при использовании контр-инъекции нижний порог Н-моды по плотности составлял $0.5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, что в 2.5 раза ниже, чем в омическом режиме и в режиме с ко-инъекцией [3]. Другим преимуществом применения контр-инъекции является то, что она позволяет создавать сильное вращение плазмы, подавляющее резистивную моду, стабилизируемую стенкой (resistive wall mode). Так, на токамаке MAST вращение плазмы, создаваемое с помощью контр-инъекции ато-

мов, превосходило вращение, создаваемое с помощью ко-инъекции [4].

В то же время необходимо отметить, что контр-инъекция атомов высокой энергии на сферических токамаках мало исследована. В первую очередь это связано с тем, что в мире существовало всего четыре сферических токамака, оборудованных инжекторами атомов высокой энергии — NSTX, MAST, Глобус-М и START (установка разобрана). Эксперименты на токамаках START и MAST показали, что высокие потери вводимой мощности, характерные для НИ на сферических токамаках, значительно возрастают при применении контр-инъекции и достигают 97% [5] и 50–80% [6] соответственно. Если на токамаке START при применении контр-инъекции не было замечено существенного улучшения удержания плазмы по сравнению с омическим режимом, то на токамаке MAST удержание плазмы значительно улучшалось, а Н-фактор был в 2 раза выше, чем при ко-инъекции. В настоящей статье описаны результаты первых экспериментов по контр-инъекции на токамаке Глобус-М.

Условия проведения эксперимента и используемые методы

Эксперименты проводились на компактном сферическом токамаке Глобус-М [7] (большой радиус плазмы $\approx 0.36 \text{ м}$, малый радиус $\approx 0.24 \text{ м}$). Дейтериевая плазма удерживалась в диверторной конфигурации с нижней Х-точкой. Тороидальное магнитное поле $B_{\text{тор}}$ составляло 0.4 Т, ток плазмы I_p варьировался от 120 до 200 кА.

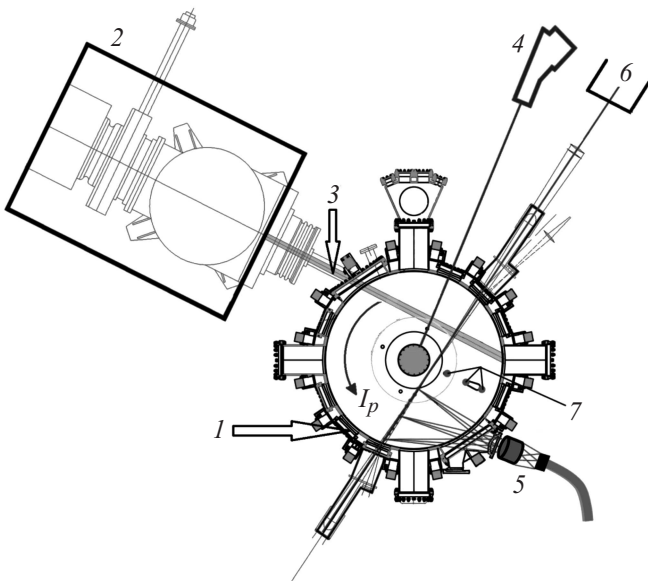


Рис. 1. Схема эксперимента. 1 — токамак Глобус-М, 2 — комплекс нейтральной инжекции, 3 — линия инжекции, 4 — анализатор атомов перезарядки АКОРД-12, 5 — объектив системы томсоновского рассеяния, 6 — лазер системы томсоновского рассеяния, 7 — каналы СВЧ интерферометра.

В качестве источника атомов высокой энергии использовался комплекс нейтральной инжекции [8]. В экспериментах применялся водородный пучок с энергией 18 keV длительностью 30–40 мс, при этом вводимая мощность составляла 260–310 kW. Схема эксперимента показана на рис. 1. Инжекция пучка осуществлялась в направлении против тока плазмы. Профили электронной плотности и температуры измерялись с помощью диагностики томсоновского рассеяния лазерного излучения [9]. Значение среднехордовой электронной плотности определялось с помощью СВЧ интерферометра. Центральная ионная температура измерялась анализатором АКОРД-12 [10], линия наблюдения которого направлена вдоль большого радиуса токамака в экваториальной плоскости. Значение электронной плотности и температуры вблизи последней замкнутой магнитной поверхности измерялось с помощью подвижного ленгмюровского зонда. Магнитная конфигурация восстанавливалась с помощью кода EFIT [11], а профиль ионной температуры — с помощью кода DOUBLE [12]. Для расчета потерь быстрых частиц применялись коды NUBEAM [13] и трехмерный алгоритм, вычисляющий траектории частиц [14], объединенный с решением уравнения Больцмана [15]. Данные коды используют разные подходы для моделирования поведения быстрых ионов в токамаке, а их применение на токамаке Глобус-М было верифицировано в режиме ко-инжекции [16]. Для расчета орбит быстрых частиц в коде NUBEAM применяется обобщенное дрейфовое приближение, адаптированное для использования в сферических токамаках, а моделирование замедления быстрых ионов осуществляется с помощью статистического метода Монте-Карло.

Трехмерный алгоритм [14] вычисляет орбиты частиц без приближений путем решения уравнения движения в электрическом и магнитном полях. Данный метод требует больше компьютерных ресурсов, однако наиболее точно описывает траектории движения частиц. Замедление описывается кинетическим уравнением Больцмана со столкновительным членом Ландау [15] с учетом диффузии по скоростям и потерь на перезарядку.

Влияние контр-инжекции на плазму токамака Глобус-М

Удержание плазмы в сферическом токамаке Глобус-М в режиме без дополнительного нагрева и при ко-инжекции атомов высокой энергии достаточно хорошо изучено [16]. Режим улучшенного удержания (H-мода), характеризующийся возникновением транспортного барьера для диффузии частиц, был получен как при использовании ко-инжекции атомов высокой энергии, так и за счет омического нагрева. Переход в H-моду без дополнительного нагрева не приводил к увеличению энергетического времени удержания. При этом и в омическом режиме, и в режиме с ко-инжекцией атомов высокой энергии возникали неустойчивости, локализованные на границе (ELM).

Применение контр-инжекции атомов высокой энергии в токамаке Глобус-М дает возможность получения режима улучшенного удержания, без неустойчивостей, локализованных на границе (ELM-free H-моды). Это обстоятельство отличает исследуемый режим от омического режима и режима с ко-инжекцией высокоэнергетических атомов, в которых существуют либо ELM III рода, характеризующиеся высокой частотой повторения, либо ELM I рода, период которых совпадает с периодом пилообразных колебаний, либо и те, и другие. При контр-инжекции в ELM-free H-моды отсутствуют пилообразные колебания, но присутствует МГД неустойчивость с модой $m/n = 2/1$, которая может подавляться пилообразными колебаниями в других режимах. На рис. 2 показаны характерные временные диаграммы мощности НИ, среднехордовой электронной плотности, интенсивности сигнала датчика Da в экваториальной плоскости и сигнала зонда Мирнова для разрядов с омическим нагревом дейтериевой плазмы, а также с ко- и контр-инжекцией водорода в дейтериевую плазму при токе плазмы 200 kA. После инициации перехода в режим улучшенного удержания во всех трех случаях, показанных на рис. 2, a, b, c, разряд находится в пограничном состоянии в течение 10–20 мс, совершая переходы между H-модой и L-модой (режим обычного удержания), после чего происходит окончательный переход в режим улучшенного удержания. Из рис. 2, c видно, что приблизительно через 5 мс после начала контр-инжекции разряд переходит в H-моду без ELM, что отличается от режимов без инжекции или с инжекцией по направлению тока плазмы (рис. 2, a, b).

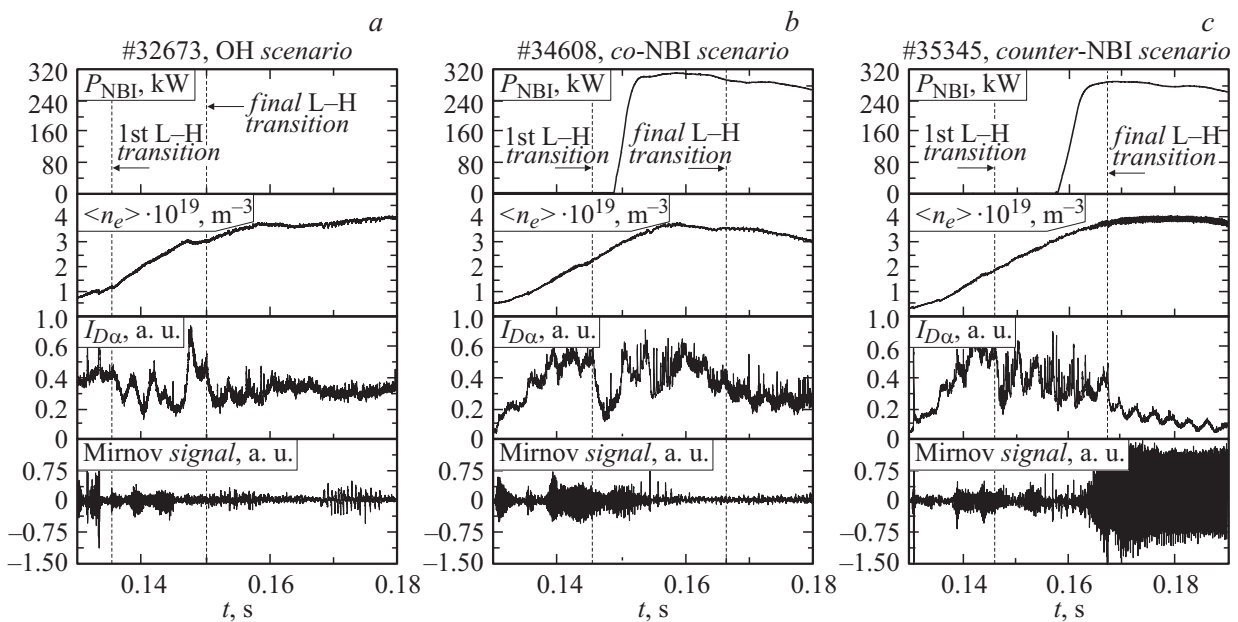


Рис. 2. Характерные временные диаграммы мощности НИ (P_{NBI}), среднехордовой электронной плотности ($\langle n_e \rangle$), сигнал датчика $D\alpha$ в экваториальной плотности ($I_{D\alpha}$) и сигнал зонда Мирнова (Mirnov signal) для разрядов с *a* — омическим нагревом плазмы, *b* — ко-инжекцией, *c* — контр-инжекцией.

Тот факт, что режим, полученный в результате применения контр-инжекции, является именно H-модой, подтверждается измерением профилей электронной плотности, полученных с помощью диагностики томсоновского рассеяния, показанных на рис. 3. Видно, что при переходе в режим улучшенного удержания наблюдается рост плотности в точке 56 см, наиболее близкой к последней замкнутой магнитной поверхности (58 см). Это связано с образованием пьедестала плотности из-за образования транспортного барьера для диффузии частиц. Этот пьедестал сохраняется при переходе в H-моду без ELM.

Возможной причиной перехода в режим улучшенного удержания является высокое значение электрического поля, связанное с большими потерями быстрых ионов, а отсутствие ELM может быть объяснено уменьшением градиента давления на границе из-за существования моды $m/n = 2/1$ (рис. 2, *c*). Моделирование с помощью трехмерного алгоритма для расчета траекторий частиц показывает, что потери ионов с энергией 18 keV с первой орбиты составляют 85–95%, а полные потери достигают 97%, в то время как при ко-инжекции с такими же параметрами пучка и плазмы потери с первой орбиты приблизительно равны 15% [17]. Отметим, что моделирование контр-инжекции с помощью кода NUBEAM также показывает существенные значения потерь с первой орбиты: около 50%, в то время как полные потери составляют $\approx 70\%$. Занижение значений потерь в коде NUBEAM связано с использованием в нем дрейфового приближения. Из-за этого корректное применение NUBEAM возможно только для случая низких потерь ионов высокой энергии. В условиях, когда потери велики, как в случае с контр-инжекцией атомов

высокой энергии, результаты расчетов с помощью кода NUBEAM можно использовать только для качественной оценки.

Высокие потери быстрых частиц также косвенно подтверждаются в эксперименте. Рост ионной температуры во время контр-инжекции не превышает 10% по сравнению с омическим режимом, в то время как при ко-инжекции в тех же условиях достигается двукратное увеличение ионной температуры. Кроме того, в экспериментах

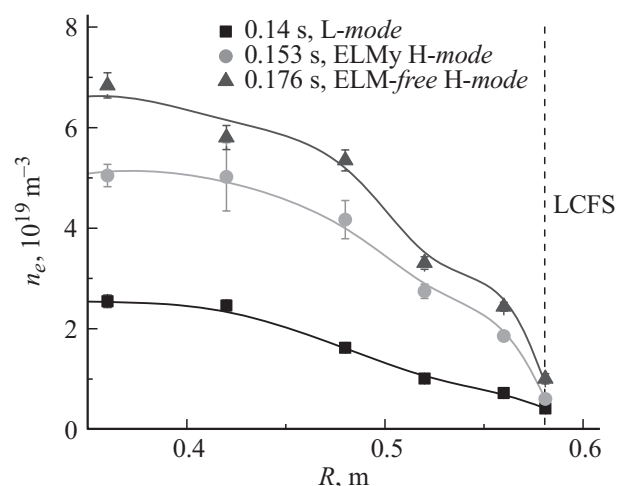


Рис. 3. Профили электронной плотности в разряде #35345, полученные с помощью системы томсоновского рассеяния лазерного излучения. Штрихами показана последняя замкнутая магнитная поверхность. Значение плотности на последней замкнутой магнитной поверхности получено с помощью измерений подвижным ленгмюровским зондом.

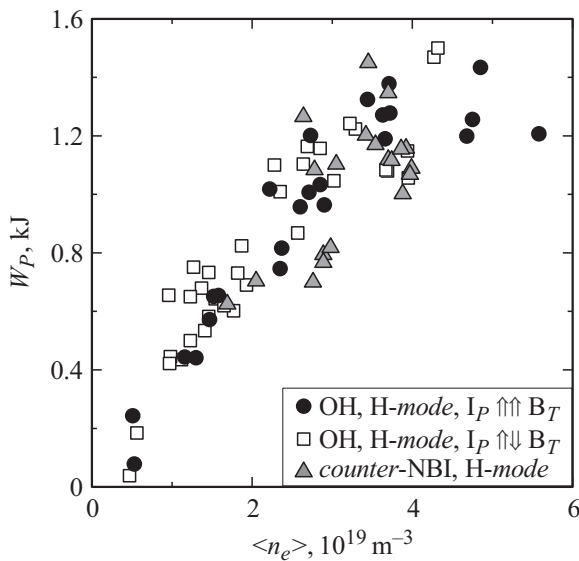


Рис. 4. Зависимость энергетического содержания плазмы токамака Глобус-М от среднехордовой электронной плотности плазмы для режима с омическим нагревом (случай, когда ток плазмы и тороидальное магнитное поле сонаправлены и разнонаправлены) и с контр-инжекцией атомов высокой энергии.

с ко-инжекцией уровень потерь быстрых частиц ниже, поэтому применение пучка атомов с энергией 26 keV мощностью до 600 kW не приводит к срыву разряда, как это происходит в случае контр-инжекции. Благодаря этому при ко-инжекции легко удается получить рост ионной температуры более чем в три раза. Наличие высоких потерь быстрых частиц также подтверждается отсутствием изменения энергосодержания плазмы по сравнению с омической H-модой, определяемого с помощью диамагнитных измерений. Это обстоятельство подтверждает рис. 4, на котором показана зависимость тепловой энергии плазмы токамака Глобус-М от ее среднехордовой электронной плотности в омической H-моды (случай, когда ток плазмы и тороидальное магнитное поле сонаправлены и разнонаправлены) и с контр-инжекцией атомов высокой энергии.

Эксперименты по ко-инжекции показали, что при увеличении тока плазмы и расстояния плазма–стенка со стороны слабого магнитного поля наблюдается повышение эффективности нагрева ионного компонента плазмы, связанное с уменьшением потерь быстрых частиц [18]. В аналогичных экспериментах с контр-инжекцией ток плазмы менялся от 120 до 200 кА, а расстояние плазма–стенка — от 3 до 6 см. Увеличение расстояния между плазмой и стенкой при контр-инжекции не привело к росту температуры ионов. Увеличение тока плазмы приводило к росту ионной температуры на 10%, в то время как в экспериментах с ко-инжекцией при таком же увеличении тока наблюдался рост температуры ионов до 35%. Незначительный рост ионной температуры при увеличении тока плазмы в эксперимен-

тах с контр-инжекцией почти не связан с улучшением удержания быстрых частиц, а объясняется в основном увеличением мощности омического нагрева. Описанные отличия в экспериментах с ко- и контр-инжекцией связаны с разным характером потерь быстрых ионов с первой орбиты. Характерные орбиты ионов водорода с энергией 18 keV, теряемых из-за столкновения со стенкой, показаны на рис. 5. Как видно из рисунка, в случае ко-инжекции частица теряется, попадая на внешнюю стенку токамака из-за большой ширины орбиты. Изменение расстояния плазма–стенка приводит к сдвигу орбиты внутрь установки, а увеличение тока плазмы — к сужению орбиты. В результате удержание быстрых частиц и эффективность нагрева плазмы улучшаются. В случае контр-инжекции частица теряется из-за того, что ее орбита попадает в нижний купол установки. Сдвиг внутрь и сжатие орбиты не приводят к изменению ее формы для большинства ионов, и, следовательно, слабо влияют на удержание быстрых частиц.

В токамаке Глобус-М2 [19], сборка которого завершается в настоящее время, тороидальное магнитное поле будет увеличено до 1 Т, а ток плазмы — до 500 кА. Моделирование показывает, что при контр-инжекции, как и в случае с ко-инжекцией [17], одновременное изменение тороидального магнитного поля и тока плазмы в два с половиной раза приведет к уменьшению потерь быстрых частиц, более существенному, чем в описанных выше

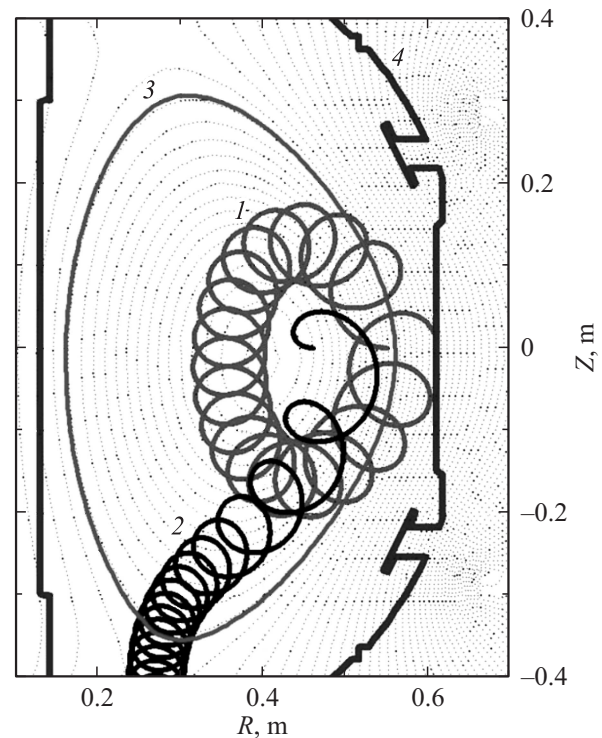


Рис. 5. Характерные орбиты теряемого из-за столкновения со стенкой иона водорода с энергией 18 keV в полоидальном сечении токамака. 1 — случай ко-инжекции, 2 — случай контр-инжекции, 3 — последняя замкнутая магнитная поверхность, 4 — стенка вакуумной камеры токамака.

экспериментах с изменением тока плазмы. Однако потери при контр-инжекции все еще будут велики и составят около 70%. Улучшение удержания быстрых частиц позволит повысить энергию инжекции до 25–30 keV, в связи с чем мощность инжекции может быть поднята до 0.6–1 MW, что невозможно в описанных экспериментах из-за срыва разряда, вызванного повышенным поступлением примесей. На токамаке Глобус-М2 также планируется установка второго инжектора атомов высокой энергии с рабочими параметрами 50 keV, 1 MW. Уменьшение прицельного параметра инжекции с 32 до 28 см позволит снизить потери высокоэнергетичных ионов еще на 10%. Несмотря на то что доля удерживаемых частиц будет мала, поглощенная мощность инжекции возрастет более чем на порядок по сравнению с токамаком Глобус-М и составит до 0.5 MW.

Заключение

Впервые на токамаке Глобус-М проведены эксперименты по контр-инжекции атомов высокой энергии. Получена ELM-free H-мода. Отсутствие ELM может быть объяснено уменьшением градиента давления на границе из-за существования моды $m/n = 2/1$, которая в разрядах без контр-инжекции подавляется пилообразными колебаниями. В токамаке Глобус-М ELM не представляют угрозы для элементов конструкции первой стенки и дивертора из-за низкого энергосодержания плазмы и, как следствие, низкой нагрузки на эти элементы. В более крупных установках будущего ELM необходимо ослабить или полностью подавить. Применение контр-инжекции для получения H-моды без ELM может быть удачной альтернативой методам контроля ELM благодаря своей простоте. В то же время улучшения удержания плазмы по сравнению с омической H-модой в первых экспериментах по контр-инжекции на Глобус-М не зафиксировано, что может указывать на сходство результатов с установкой START.

Возможной причиной перехода в режим улучшенного удержания является высокое значение электрического поля, связанное с большими потерями быстрых ионов. Как показывают расчеты, полные потери быстрых частиц могут достигать 97%. Высокие потери быстрых частиц косвенно подтверждаются экспериментально — рост ионной температуры во время контр-инжекции не превышает 10%. Также не наблюдается заметного роста энергосодержания плазмы. Изменение тока плазмы и расстояния плазма–стенка не приводило к улучшению удержания быстрых ионов, как это происходило в экспериментах с ко-инжекцией атомов высокой энергии. Это связано с различием орбит теряющихся ионов. При ко-инжекции частицы попадают на внешнюю стенку токамака, а при контр-инжекции — в диверторную область. Следует отметить, что в токамаках будущего нагрузка, создаваемая быстрыми ионами, теряемыми в диверторной области, представляет меньшую опасность,

чем нагрузка, создаваемая быстрыми ионами, попадающими в стенку камеры. Тем не менее из-за того, что при контр-инжекции уровень потерь быстрых частиц выше, однозначный ответ об относительной опасности такой нагрузки можно дать только с помощью моделирования конкретных экспериментальных условий. Эксперименты по контр-инжекции будут продолжены на токамаке Глобус-М2. Моделирование предсказывает, что в новой установке поглощенная мощность инжектируемых атомов высокой энергии возрастет более, чем на порядок. Это, а также увеличение тороидального поля и тока плазмы позволит существенно расширить диапазон экспериментальных параметров.

Н.Н. Бахарев, Г.С. Курскиев, А.Д. Сладкомедова и П.Б. Щеголев благодарят за финансовую поддержку РФФИ, научный проект № 16-32-00027 мол_а.

Список литературы

- [1] *Federici G., Loarte A., Strohmayer G.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2003. Vol. 45. P. 1523.
- [2] *Burrell K.H., Austin M.E., Brennan D.P.* et al. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2002. Vol. 44. P. 253–263.
- [3] *Lebedev S.V., Askinazi G.L., Chernyshev F.V.* et al. // Nucl. Fusion. 2009. Vol. 49. P.85029.
- [4] *Helander P., Akers R.J., Eriksson L.G.* // Phys. Plasmas. 2005. Vol. 12. P. 112503.
- [5] *Akers R.J., Appel L.C., Carolan P.G.* et al. // Nucl. Fus. 2002. Vol. 42. P. 122–135.
- [6] *Akers R.J., Helander P., Tournianski A.* et al. // Proc. 31st EPS Conf. on Plasma Phys., London, 2004. ECA Vol. 24G. P. 4. 188 c.
- [7] *Gusev V.K., Bakharev N.N., Belyakov V.A.* et al. // Nucl. Fus. 2015. Vol. 55. P. 104016.
- [8] *Гусев В.К., Деч А.В., Есенов Л.А.* et al. // ЖТФ. 2007. Vol. 77. P. 28–43.
- [9] *Курскиев Г.С., Толстяков С.Ю., Березуцкий А.А.* и др. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2012. Т. 2. С. 81–88.
- [10] *Izvozhnikov A.B., Petrov M.P., Petrov S.Ya., Chernyshev F.V., Shystov I.V.* // Tech. Phys. 1992. Vol. 37. P. 201.
- [11] *Lao L.L., John H. St., Stambaugh R.D., Kellman A.G., Pfeiffer W.* // Nucl. Fus. 1985. Vol. 25. P. 1611.
- [12] *Afanasyev V.I., Gondhalekar A. and Kislyakov A.I.* On the possibility of determining the radial profile of hydrogen isotope composition of JET plasmas, and of deducing radial transport of the isotope ions. 1999. JET-R-(00)04 www.iop.org/Jet/fulltext/JETR00004.pdf.
- [13] *Pankin A., McCune D., Andre R., Bateman G. and Kritiz A.* // Comput. Phys. Commun. 2004. Vol. 159. P. 157.
- [14] *Чернышев Ф.В., Афанасьев В.И., Гусев В.К.* и др. // Физика плазмы. 2011. Т. 37. С. 595–615.
- [15] *Goncharov P.R., Kuteev B.V., Ozaki T., Sudo S.* // Phys. Plasmas. 2010. Vol. 17. P. 112313.
- [16] *Kurskiev G.S., Gusev V.K., Sakharov N.V.* et al. // PPCF. 2017. Vol. 59. P. 045010.
- [17] *Bakharev N.N., Chernyshev F.V., Goncharov P.R.* et al. // Nucl. Fus. 2015. Vol. 55. P. 55043023.
- [18] *Бахарев Н.Н., Гусев В.К., Ибляминова А.Д.* и др. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. С. 22–30.
- [19] *Gusev V.K., Azizov E.A., Alekseev A.B.* et al. // Nucl. Fus. 2013. Vol. 53. P. 093013.