

## ИЗУЧЕНИЕ ЗАХВАТА И НАКОПЛЕНИЯ БЫСТРЫХ ИОНОВ В ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ С АТОМАРНОЙ ИНЖЕКЦИЕЙ НА УСТАНОВКЕ ГОЛ-NB

© 2022 г. В. В. Поступаев<sup>а, \*</sup>, В. И. Баткин<sup>а</sup>, А. В. Бурдаков<sup>а</sup>, В. С. Бурмасов<sup>а</sup>,  
И. А. Иванов<sup>а</sup>, К. Н. Куклин<sup>а</sup>, Ю. А. Лыкова<sup>а</sup>, К. И. Меклер<sup>а</sup>, Н. А. Мельников<sup>а</sup>,  
А. В. Никишин<sup>а</sup>, С. В. Полосаткин<sup>а</sup>, А. Ф. Ровенских<sup>а</sup>, Е. Н. Сидоров<sup>а</sup>,  
В. Ф. Скляр<sup>а</sup>, Д. И. Сквородин<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

\*e-mail: V.V.Postupaev@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 20.04.2022 г.

После доработки 25.05.2022 г.

Принята к публикации 15.06.2022 г.

Представлены результаты предварительных экспериментов по инъекции атомарных пучков с мощностью около 1 МВт в центральную ловушку установки ГОЛ-NB. Основной технической задачей работ была интегральная проверка работы всех систем и основных диагностик. Приводятся результаты, относящиеся к ослаблению атомарных пучков в плазме и к параметрам популяции быстрых ионов. В обсуждаемых режимах коэффициент ослабления потока инжектируемых частиц нагретых пучков плазмой доходит до 40% при одновременном начале накопления стартовой плазмы в ловушке и ее нагрева нейтральными пучками. Обсуждается динамика накопления и энергетический спектр популяции быстрых ионов в плазме в результате нейтральной инъекции, анализируются физические механизмы, которые могут обеспечить наблюдаемый спектр быстрых ионов.

**Ключевые слова:** плазма, открытая магнитная ловушка, многопробочная ловушка, ГОЛ-NB, нейтральная инъекция, быстрые ионы, диагностика плазмы

**DOI:** 10.31857/S0367292122600340

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Многопробочные магнитные системы были предложены в [1, 2] как способ увеличения времени жизни плазмы в открытых ловушках. В такой системе магнитное поле является гофрированным (периодически модулированным вдоль оси установки). При расширении плазмы вдоль магнитного поля, взаимодействие популяций пролетных и локально-запертых частиц плазмы в каждой элементарной ячейке многопробочной системы приводит к появлению силы трения, которая тормозит выходящий вдоль оси установки плазменный поток. Наиболее эффективно такой метод удержания работает при умеренной столкновительности  $\nu^* = l/\lambda \approx 1$ , где  $l$  – период гофрировки (расстояние между максимумами) магнитного поля, а  $\lambda$  – длина свободного пробега иона в плазме [3]. Более подробно результаты работ по данному направлению изложены в [4]. Первоочередной задачей установки ГОЛ-NB в существующей конфигурации должно стать исследование режима  $\nu^* \approx 1$  и прямая демонстрация эффективности секций установки с многопробочным маг-

нитным полем [5, 6]. В дальнейшем, при создании дополнительных систем нагрева плазмы, возможен переход в режим  $\nu^* \ll 1$ , который более интересен для термоядерных приложений [7].

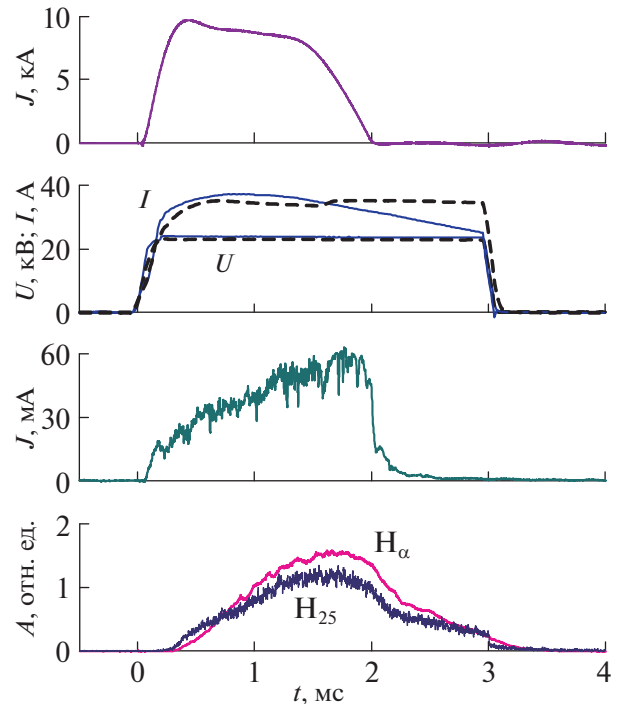
Эксперименты в проектной конфигурации ГОЛ-NB стартовали в начале 2021 г. До начала данной работы были решены задачи транспортировки низкотемпературной стартовой плазмы с  $\nu^* \gg 1$  через секцию с многопробочным магнитным полем [8], исследовано заполнение центральной ловушки стартовой плазмой с плотностью на оси установки  $n(0) \approx 10^{20} \text{ м}^{-3}$ , и электронной температурой  $T \approx 5 \text{ эВ}$  [9]. В этой статье мы сообщаем о результатах предварительных экспериментов по инъекции двух пучков атомов водорода с суммарной мощностью около 1 МВт в центральную ловушку ГОЛ-NB. Основной задачей была интегральная проверка работы всех систем и основных плазменных диагностик. Приводятся результаты, относящиеся к ослаблению атомарных пучков в плазме и к параметрам популяции возникающих быстрых ионов.

## 2. УСТАНОВКА И ДИАГНОСТИКИ

Установка ГОЛ-NB состоит из центральной ловушки газодинамического типа длиной 2.5 м с магнитной индукцией в центре  $B = 0.3$  Тл, пристыкованных к ней секций сильного поля длиной около 3 м каждая с  $B = 4.5$  Тл и торцевых расширителей магнитного потока. В расширителях находятся плазмодриемники и плазменная пушка с дуговым источником водородной плазмы [10]. Секции сильного поля могут включаться в соленоидальной конфигурации с однородным магнитным полем, либо в многопробочной конфигурации с глубиной гофрировки магнитного поля  $R_m = B_{\max}/B_{\min} = 1.4$  и периодом 22 см. Более подробно конструкция установки описана в [9]. В данных экспериментах секции сильного поля включались в соленоидальной конфигурации с  $B = 2.25$  Тл. Два пучка атомов водорода [11] с энергией инжекции  $E = 25$  кэВ и суммарной мощностью до 1.1 МВт инжектируются в плазму перпендикулярно оси на  $z = \pm 0.4$  м (продольная координата  $z$  отсчитывается от средней плоскости ловушки). Особенность сценария эксперимента состояла в том, что происходило практически одновременное включение плазменной пушки и нагревных атомарных пучков (см. рис. 1). Это не является оптимальным с точки зрения эффективности захвата быстрых частиц плазмой, однако позволяет использовать нейтральные пучки в качестве диагностики в течение всего плазменного разряда.

Ранее, в [8, 9] нами использовались четырехэлектродные ленгмюровские зонды [12] для измерения параметров стартовой плазмы. Поскольку зонды в центральной ловушке несовместимы с инжекцией нейтральных пучков, то зондовые измерения проводились в секции сильного поля на  $z = 1.26$  м. Диагностикой динамики плотности плазмы в ловушке являлось ослабление нейтральных пучков плазмой. Радиальный профиль пучка диагностируется при помощи многопроводочного детектора, который может регистрировать либо токи вторичной эмиссии, либо изменение резистивности проволочек при их нагреве прошедшим пучком. Второй метод нечувствителен к магнитному полю и заряду частиц, но имеет низкое временное разрешение. Оба метода дают согласующиеся результаты.

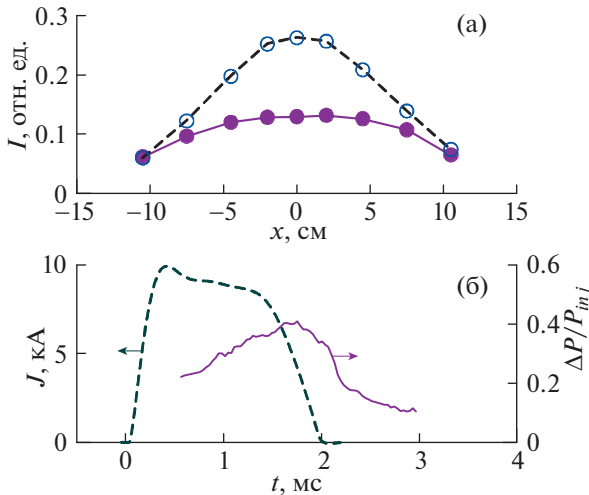
Динамика плотностей плазмы и популяции быстрых ионов, образующихся в результате нейтральной инжекции в плазму, изучалась при помощи оптической спектральной диагностики, измеряющей излучение плазмы в окрестности линии атома водорода  $H_\alpha$  [13]. Эта система состоит из спектрометра МДР-12 с цифровой камерой SDU-285, которая измеряет спектр с временным разрешением от 10 мкс, спектрометра МДР-23 с блоком ФЭУ-84, настроенных на отдельные



**Рис. 1.** Основные сигналы в эксперименте NB5941 сверху вниз: ток разряда в плазменной пушке, ускоряющие напряжения  $U$  и токи в цепи высокого напряжения  $I$  инжекторов двух нейтральных пучков (различаются типом линии), ионный ток насыщения ленгмюровского зонда на  $r = 0$ ,  $z = 1.26$  м, сигналы ФЭУ, настроенных на линии  $H_\alpha$ , соответствующие холодной плазме и доплеровски-смещенной линии от ионов 25 кэВ (обозначены как  $H_\alpha$  и  $H_{25}$ ).

спектральные интервалы, и камеры SDU-285 с узкополосным интерференционным фильтром, регистрирующей пространственное распределение излучения. Спектральные приборы наблюдают излучение плазмы под углом  $45^\circ$  к направлению оси ввода нейтрального пучка на  $z = \pm 0.4$  м. Это позволяет разделять излучение плазмы и излучение популяции быстрых ионов по доплеровскому сдвигу линий.

Спектр быстрых частиц измерялся при помощи анализатора нейтралов перезарядки, который также располагался на  $z = -0.4$  м. Конструкция анализатора аналогична конструкциям ранее изготовленных аналогичных приборов для установок С-2 и MST [14]. Детектирующая система анализатора включала в себя 11 каналов, регистрирующих частицы с энергиями от 6 до 25 кэВ с энергетическим разрешением около 4 кэВ. Анализатор регистрировал частицы, покидающие плазму перпендикулярно оси, точка прицеливания была смещена от оси на ларморовский радиус быстрого иона  $r = 5$  см.



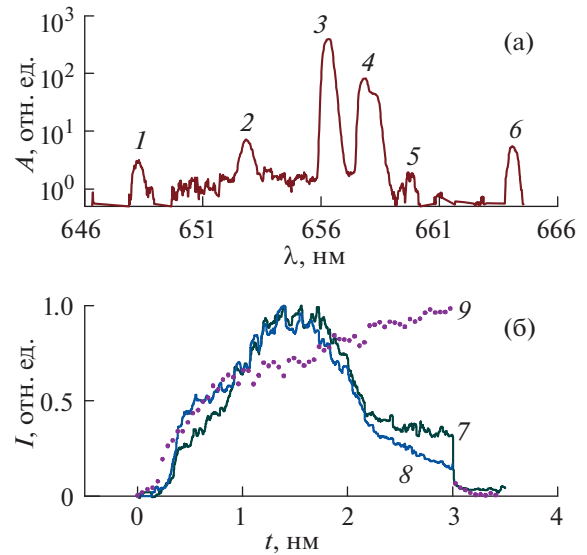
**Рис. 2.** Вверху: профили нейтрального пучка в интервале  $t = [1.35-1.85]$  мс по сигналам многопроволочного детектора, работающего в режиме измерения вторичной эмиссии, показанные для экспериментов NB5941 с плазмой (пустые кружки) и контрольного эксперимента NB5939 без плазмы;  $x$  – поперечная координата. Внизу: динамика тока разряда плазменной пушки (штриховая линия) и ослабления нагревного пучка в плазме (сплошная линия) для NB5941.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В этом разделе будут обсуждаться результаты, относящиеся к конкретному эксперименту NB5941. На рис. 1 приведены сигналы, характеризующие динамику плазмы в установке. Ток разряда длится около 2 мс, длительность нейтральной инжекции установлена 3 мс для наблюдения плазмы также и в процессе ее распада. Плотность плазмы в выходной секции сильного поля растет в течение работы пушки, что свидетельствует о накоплении плазмы в ловушке. На сигнале спектрального канала, соответствующего атомам пучка с энергией 25 кэВ, наблюдается скачок в момент выключения инжекции.

На рис. 2 показаны радиальные профили, характеризующие ослабление пучка в плазме. Интегральный по сечению пучка коэффициент ослабления достигает 40% к концу работы плазменной пушки. Отметим, что “тень” плазмы не отражает точно ее геометрические параметры, поскольку пучки инжекторов сфокусированы на расстоянии 0.5 м перед осью ловушки. Диаметр стартовой плазмы в этом режиме работы меньше диаметра нагревного атомарного пучка, что снижает интегральную эффективность захвата.

Спектр излучения вблизи линии  $H_\alpha$  приведен на рис. 3. Самым ярким является излучение холодных атомов вблизи длины волны 656.28 нм (3 на рис. 3), которые можно ассоциировать с мишенной плазмой. В спектре присутствует доплеровски-смещенная в синюю область линия  $H_\alpha$  от инжектируемых атомов (2). Их излучение, отра-



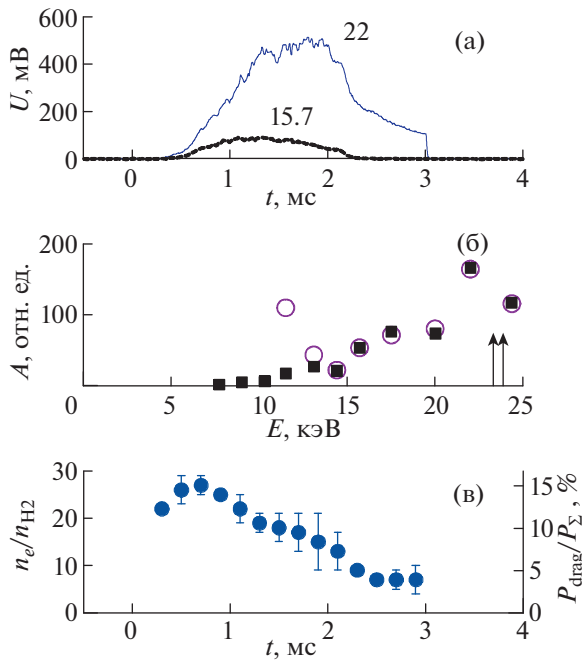
**Рис. 3.** Спектр излучения плазмы в области линии  $H_\alpha$  656.28 нм в сечении инжекции пучка быстрых атомов водорода для интервала  $t = [1.5-1.7]$  мс. Направление наблюдения  $45^\circ$  навстречу пучку. Обозначения: 1 – НП 648.2 нм, 2 –  $H_\alpha$  атомов пучка с энергией 25 кэВ, 3 –  $H_\alpha$  мишенной плазмы, 4 – СП 657.8 и 658.3 нм, 5 – блик  $H_\alpha$  пучка от стенки камеры, 6 – ОП 664.1 нм, 7 – динамика накопленных быстрых протонов, 8 – динамика плотности электронов, 9 – плотность тока быстрых атомов.

женное от противоположной стенки вакуумной камеры, попадает в красную область спектра (5). В спектре присутствуют также линии ионов примесей. Излучение крыльев линии  $H_\alpha$  создается атомами, рождающимися при перезарядке быстрых ионов в плазме. Динамику спектра можно использовать для качественного определения плотностей электронов  $n_e$  и быстрых протонов  $n_{fp}$  (в предположении пространственно-однородного источника)

$$n_e \propto \frac{I_b}{J_b}, \quad n_{fp} \propto \frac{I_f}{I_s} \times \frac{I_b}{J_b},$$

где  $I_b$  – интенсивность излучения  $H_\alpha$  атомов пучка,  $J_b$  – известная плотность тока инжектируемых атомов,  $I_f$  – интенсивность излучения  $H_\alpha$  быстрых атомов от перезарядившихся быстрых ионов,  $I_s$  – интенсивность излучения  $H_\alpha$  мишенной плазмы. Результаты приведены на нижней части рис. 3.

Сигналы двух каналов анализатора и энергетический спектр нейтралов перезарядки приведены на рис. 4. В спектре доминируют ионы с энергиями, близкими к энергии инжекции, что указывает на наличие дополнительного канала потерь быстрых ионов. Возможным каналом потерь является перезарядка на фоновом газе в плазме. Измеренный спектр сравнивался с предсказаниями простой модели динамики функции распределения быстрых ионов, учитывающей торможение за



**Рис. 4.** а) – динамика потока нейтралов перезарядки в каналах 22 и 15.7 кэВ; б) – измеренный энергетический спектр в  $t = 0.7$  мс (кружки) и его подгонка моделью (квадраты); в) – отношение средних (по траектории движения иона) концентраций электронов и нейтрального газа  $\chi = n_e/n_{H_2}$ , рассчитанное для  $T = 5$  эВ. Стрелки соответствуют энергиям нейтральных пучков.

счет передачи энергии электронам и потери частиц вследствие перезарядки на молекулярном водороде. В квазистационарном случае функция распределения ионов по полной скорости  $f_i(v_i)$  может быть получена интегрированием кинетического уравнения

$$\frac{\partial}{\partial v_i} \left( -f_i \frac{v_i}{\tau_{drag}(v_i)} \right) = -\frac{f_i}{\tau_{cx}(v_i)},$$

откуда

$$f_i(v_i) \sim \frac{\tau_{drag}}{v_i} \exp \int_{v_i}^{v_{inj}} \frac{\tau_{drag}(v'_i) dv'_i}{\tau_{cx}(v'_i) v'_i},$$

где  $v_{inj}$  – скорость ионов при энергии инжекции,  $\tau_{drag}$  и  $\tau_{cx}$  – характерные времена торможения и перезарядных потерь быстрых ионов.

В свою очередь, эти характерные времена можно выразить как [15]

$$\tau_{cx} = (n_{H_2} \sigma_{cx} v_i)^{-1},$$

$$\tau_{drag} = \left( n_e \sigma_{ie} v_i \int_0^2 f_M(T_e, E_e) dE_e \right)^{-1},$$

где  $f_M$  – функция распределения Максвелла,  $\sigma_{ie} = 4\pi a_B^2 \Lambda \frac{m_i}{m_e} \left( \frac{Ry}{E_i} \right)^2$  – транспортное сечение для столкновений быстрых ионов с электронами,  $\sigma_{cx}$  – сечение перезарядки,  $\Lambda$  – кулоновский логарифм,  $Ry = 13.6$  эВ – постоянная Ридберга,  $a_B$  – радиус Бора.

Таким образом, при заданной электронной температуре форма функции распределения определяется одним параметром  $\chi = n_e/n_{H_2}$  – отношением средних (по траектории движения иона) концентраций электронов и газа. Результат вписывания модельной функции распределения в измеренный спектр быстрых частиц также показан на рис. 4. Функция распределения рассчитывалась по шести наиболее высокоэнергетичным каналам анализатора с учетом разной чувствительности каналов (в низкоэнергетических каналах появляется вклад частиц с половинной энергией от ускоренных молекул водорода, поэтому они не учитывались).

Динамика отношения средних концентраций электронов и фонового газа в плазме показана на рис. 4в. Интегрирование полученной функции распределения быстрых ионов позволяет найти долю мощности, передаваемой захваченными ионами электронам плазмы. Она составляет около 15% от захваченной мощности пучков в максимуме (см. рис. 4в, правая шкала). Отметим, что последняя цифра практически не зависит от предположения об электронной температуре и является более точной, чем параметр  $\chi$ .

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Физическим проектом ГОЛ-НВ предусматривается [5, 6], что энергия нейтральных пучков должна быстро термализоваться в плазме с плотностью  $n > 3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$  за счет торможения на электронах. При этом популяция быстрых ионов имеет небольшую плотность, и система является безопасной относительно основных неустойчивостей быстрых ионов. Температура плазмы устанавливается при достижении энергетического баланса между нагревом нейтральными пучками и продольными газодинамическими потерями. При этом по расчетам [16], плазма в установке ГОЛ-НВ должна переходить в режим  $v^* \approx 1$ , благоприятный для многопробочного удержания плазмы.

В представленных экспериментах диаметр мишенной плазмы был меньше проектного. Это привело к двум последствиям. Во-первых, часть нейтрального пучка проходила по редкой периферии плазмы, тем самым снижался средний коэффициент захвата. Во-вторых, ларморовский радиус быстрых ионов (около 65 мм) превышал

радиус плазменного столба (около 40 мм), так что значительная часть их траектории проходила в редкой периферийной плазме. Тем самым увеличилась роль перезарядных потерь быстрых ионов.

Низкотемпературная стартовая плазма создается плазменной пушкой. При этом наиболее плотная центральная часть плазмы стабилизирована вмороженностью магнитного поля в торец вакуумной камеры в пределах магнитной поверхности, опирающейся на отверстие в плазмодриемнике, через которое стартовая плазма инжектируется вдоль магнитного поля [9]. Во время накопления плазмы в центральной ловушке происходит постепенное формирование плазменного гало в пределах магнитной поверхности, ограниченной лимитерами. Предполагается, что эта периферийная часть плазмы будет стабилизирована техникой вихревого удержания, подобно тому, как это работает на установке ГДЛ [17]. В проведенных экспериментах наблюдался постепенный рост плотности частиц, удерживаемых в области гало. Поэтому можно получить одновременное улучшение эффективности захвата атомарных пучков в плазменной мишени и снижение доли перезарядных потерь при увеличении длительности работы плазменной пушки и оптимизации режима генерации плазмы при повышенном магнитном поле в районе пушки.

Основным результатом проведенной серии экспериментов является демонстрация полной работоспособности установки и имеющихся диагностик в проектной конфигурации ГОЛ-НВ. По результатам контрольных экспериментов с инжекцией атомарных пучков в остаточный газ можно утверждать, что не наблюдается существенных потерь быстрых ионов из-за отклонений магнитного поля от расчетного значения. На данном этапе работ, секции сильного поля включались с  $B = 2.25$  Тл для увеличения плотности мишени плазмы в ловушке. Эксперименты с  $B = 4.5$  Тл также проводились. При этом эффективность захвата атомарных пучков была ожидаемо меньше, однако увеличение пробочного отношения с  $R = 7.5$  до  $R = 15$  вдвое уменьшает газодинамические продольные потери.

Сооружение и эксплуатация установки ГОЛ-НВ финансируется Министерством науки и высшего образования Российской Федерации. Изучение устойчивости плазмы в ГОЛ-НВ проводится при финансовой поддержке гранта РНФ № 21-12-00133; <https://rscf.ru/en/project/21-12-00133/>.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будкер Г.И., Мирнов В.В., Рюттов Д.Д. // Письма в ЖЭТФ. 1971. Т. 14. С. 320.
2. Logan B.G., Lichtenberg A.J., Lieberman M.A., and Makhijani A. // Phys. Rev. Lett. 1972. V. 28. P. 144. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.28.144>
3. Mirnov V.V., Ryutov D.D. // Nucl. Fusion. 1972. V. 12. P. 627. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/12/6/001>
4. Бурдаков А.В., Поступаев В.В. // УФН. 2018. Т. 188. С. 651. <https://doi.org/10.3367/UFN.2018.03.038342>
5. Postupaev V.V., Burdakov A.V., Ivanov A.A. // Fusion Sci. Technol. 2015. V. 68. P. 92. <https://doi.org/10.13182/FST14-846>
6. Postupaev V.V., Batkin V.I., Beklemishev A.D., Burdakov A.V., Burmasov V.S., Chernoshanov I.S., Gorbovsky A.I., Ivanov I.A., Kuklin K.N., Mekler K.I., Rovenskikh A.F., Sidorov E.N., Yurov D.V. // Nucl. Fusion. 2017. V. 57. P. 036012. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/57/3/036012>
7. Bagryansky P.A., Beklemishev A.D., Postupaev V.V. // J. Fusion Energy. 2019. V. 38. P. 162. <https://doi.org/10.1007/s10894-018-0174-1>
8. Postupaev V.V., Batkin V.I., Burdakov A.V., Burmasov V.S., Ivanov I.A., Kuklin K.N., Mekler K.I., Rovenskikh A.F., Sidorov E.N. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2020. V. 62. P. 025008. <https://doi.org/10.1088/1361-6587/ab53c2>
9. Postupaev V.V., Batkin V.I., Burdakov A.V., Burmasov V.S., Ivanov I.A., Kuklin K.N., Lykova Yu.A., Melnikov N.A., Mekler K.I., Nikishin A.V., Polosatkin S.V., Rovenskikh A.F., Sidorov E.N., Skovorodin D.I. // Nucl. Fusion. 2022. V. 62. P. 086003. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac69fa>
10. Иванов И.А., Баткин В.И., Бурдаков А.В., Куклин К.Н., Меклер К.И., Поступаев В.В., Ровенских А.Ф., Сидоров Е.Н. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 856. <https://doi.org/10.31857/S0367292121090031>
11. Batkin V.I., Bambutsa E.E., Burdakov A.V., Burmasov V.S., Gafarov M.R., Voskoboinikov R.V. // AIP Conf. Proc. 2016. V. 1771. P. 030010. <https://doi.org/10.1063/1.4964166>
12. Sidorov E.N., Batkin V.I., Burdakov A.V., Ivanov I.A., Kuklin K.N., Mekler K.I., Nikishin A.V., Postupaev V.V., Rovenskikh A.F. // J. Instrum. 2021. V. 16. P. T11006. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/11/T11006>
13. Никишин А.В., Иванов И.А., Баткин В.И., Бурдаков А.В., Куклин К.Н., Меклер К.И., Поступаев В.В., Ровенских А.Ф. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. С. 212. <https://doi.org/10.31857/S036729212203012X>
14. Polosatkin S., Belykh V., Davydenko V., Clary R., Fiksel G., Ivanov A., Kapitonov V., Liu D., Mishagin V., Tiunov M., Voskoboinikov R. // Nucl. Instr. Meth. A. 2013. V. 720. P. 42. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.12.039>
15. Трубников Б.А. Вопросы теории плазмы / под ред. М.А. Леонтовича. М.: Госатомиздат, 1963. Вып. 1. С. 98.
16. Поступаев В.В., Юров Д.В. // Физика плазмы. 2016. Т. 42. С. 966. <https://doi.org/10.7868/S036729211611007X>
17. Beklemishev A.D., Bagryansky P.A., Chaschin M.S., Soldatkina E.I. // Fusion Sci. Technol. 2010. V. 57. P. 351. <https://doi.org/10.13182/FST10-A9497>