

УПРАВЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛОМ ПЛАЗМЫ В ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ МНОГОПРОБОЧНОЙ ЛОВУШКЕ ГОЛ-NB

© 2023 г. И. А. Иванов^{a,*}, П. А. Полозова^a, В. И. Баткин^a, К. Н. Куклин^a,
В. В. Куркучек^a, Н. А. Мельников^a, С. В. Полосаткин^a, В. В. Поступаев^{a,**},
А. Ф. Ровенских^a, Е. Н. Сидоров^a, Д. И. Сквородин^a

^aИнститут ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

*e-mail: I.A.Ivanov@inp.nsk.su

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

Поступила в редакцию 31.07.2023 г.

После доработки 25.09.2023 г.

Принята к публикации 25.09.2023 г.

Представлены результаты работ по реализации метода вихревого удержания плазмы на установке ГОЛ-NB. Первые эксперименты по оптимизации подачи потенциалов на внутрикамерные электроды показали улучшение динамики захвата инжектируемых быстрых атомов водорода, а также уменьшение флуктуаций локальных параметров плазмы в центральной секции ловушки и увеличение времени распада плазмы. Геометрия расположения внутрикамерных электродов, полярности и величины приложенных потенциалов соответствует теории вихревого удержания и аналогичны работам на других открытых ловушках.

Ключевые слова: открытая ловушка, многопробочная ловушка, ГОЛ-NB, стабилизация плазмы, вихревое удержание

DOI: 10.31857/S0367292123601030, EDN: AGNZEC

1. ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение устойчивого удержания плазмы в магнитной ловушке является ключевой задачей, от решения которой зависит успех физической программы исследований. Наиболее известным методом обеспечения магнитогидродинамической (МГД) устойчивости является создание магнитных конфигураций, удовлетворяющих принципу “среднего минимума B ” [1]. На практике, возможные технические решения фактически ограничены осесимметричными системами из-за того, что в ловушках с мультипольными компонентами магнитного поля возникает быстрая неоклассическая радиальная диффузия [2]. Наряду с МГД-устойчивыми магнитными конфигурациями, используются и другие методы стабилизации плазмы в осесимметричных открытых ловушках (см., напр., обзор [3]). В данной статье мы будем рассматривать систему внутрикамерных электродов многопробочной ловушки ГОЛ-NB, предназначенную для принудительного формирования слоя с дифференциальным вращением плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях, и результаты оптимизации режимов ее работы.

Многопробочные магнитные системы были предложены в [4, 5] как способ увеличения вре-

мени жизни плазмы в открытых ловушках. В такой системе магнитное поле является гофрированным (периодически модулированным вдоль оси). При расширении плазмы вдоль магнитного поля, взаимодействие популяций пролетных и локально-запертых частиц в каждой элементарной ячейке многопробочной системы приводит к появлению силы трения, тормозящей плазменный поток. Более подробно физика многопробочного удержания и состояние работ в этой области обсуждается в обзорах [6, 7]. В настоящее время многопробочные секции рассматриваются как элементы магнитной системы открытой ловушки нового поколения ГДМЛ, на которой в полной проектной конфигурации возможно получение плазмы с субреакторными параметрами [8, 9].

Установка ГОЛ-NB представляет собой масштабную модель ГДМЛ с более скромными техническими характеристиками и более скромными достижимыми параметрами плазмы [10, 11]. Задачей работ на установке является демонстрация улучшения параметров плазмы в ловушке при активации многопробочного режима удержания и изучение основных закономерностей течения плазмы в многопробочном магнитном поле. Магнитная система установки не обеспечивает

МГД-устойчивость плазмы по критерию [1]. Поэтому в физическом проекте установки [12] предполагалось, что для МГД-стабилизации плазмы в ловушке и ограничения поперечных потерь будут использоваться два метода. На этапе первоначального заполнения ловушки низкотемпературной стартовой плазмой достаточно эффективной является стабилизация вмороженностью силовых линий магнитного поля в хорошо проводящий торец [13, 14], которым является дуговой источник стартовой плазмы. Эксперименты [15] подтвердили в целом данное предположение с некоторыми особенностями в радиальных размерах стабилизируемой области.

Стабилизация плазмы на основной стадии эксперимента ГОЛ-NB во время ее нагрева методом инъекции нейтральных пучков должна осуществляться при помощи дифференциального вращения вокруг оси. Шир полоидального вращения является известным механизмом, который обеспечивает декорреляцию турбулентного переноса в тороидальных ловушках [16, 17], что в итоге приводит к формированию транспортных барьеров в токамаках [18, 19]. Несколько разновидностей техники дифференциального вращения используется в экспериментах на открытых ловушках: неоднородный по радиусу нагрев на частоте электронно-циклотронного резонанса в амбиполярной ловушке GAMMA 10 [20], подача потенциала на лимитеры в амбиполярных ловушках Phaedrus [21] и HIEI [22] и в газодинамической ловушке ГДЛ [23], вынос потенциала из плазменной пушки в установке с конфигурацией обращенного поля (FRC) C-2 [24], подача потенциала на лимитеры и секционированные плазмодриемники на установке с геликоидальным полем СМОЛА [25]. Теоретическое описание физики подавления радиальных переносов при дифференциальном вращении в открытых ловушках исследовалось в [26] в модели с принудительным формированием радиального профиля электрического поля при контакте плазмы с электродами, и в [27] в замкнутой модели, в которой электрическая связь с торцами отсутствует. Для установки ГОЛ-NB была выбрана технологически более простая схема “вихревого удержания” [23, 26]. Необходимо сделать специальную оговорку относительно использования термина “стабилизация” применительно к технике вихревого удержания в данной работе. С формальной точки зрения, более корректно было бы говорить о технике ограничения поперечных потерь при помощи дифференциального вращения. Дифференциальное вращение не устраняет причины для возникновения конвективных неустойчивостей, оно лишь помогает ограничить поперечные потери на приемлемом уровне. Далее в тексте мы будем использовать термин “стабилизация” с этим пониманием.

На установке ГОЛ-NB была разработана и введена в эксплуатацию система, позволяющая управлять радиальным электрическим полем в плазме путем подачи потенциалов на различные осесимметричные электроды, установленные внутри вакуумной камеры установки и контактирующие с плазмой. Текст статьи организован следующим образом. В разделе 2 будет кратко приведено описание установки ГОЛ-NB. В следующем разделе будет описана система внутрикамерных электродов и алгоритмы подачи потенциалов на них. Основные экспериментальные результаты излагаются в разделе 4. Статья завершается обобщением результатов и заключением.

2. УСТАНОВКА ГОЛ-NB

Установка ГОЛ-NB была создана в ИЯФ СО РАН с целью дальнейшего развития линейных систем с магнитным удержанием, использующих метод многопробочного удержания плазмы [12]. Это осесимметричная система, состоящая из центральной ловушки газодинамического типа длиной 2.5 м, двух прилегающих к ней секций с сильным магнитным полем длиной около 3 м и концевых баков расширителей плазменного потока, см. рис. 1. Секции с сильным полем состоят из 28 катушек каждая и могут включаться в двух режимах. При одинаковой запитке катушек секция сильного поля формирует соленоидальное магнитное поле, которое фактически является длинной магнитной пробкой. В многопробочной конфигурации катушки включаются через одну, при этом формируется гофрированное магнитное поле с 13 элементарными пробкоотронами, периодом гофрировки 22 см и глубиной гофрировки (пробочным отношением многопробочной секции) $R_{\text{mm}} = B_{\text{max}}/B_{\text{min}} = 1.4$. Программа работ на установке предусматривает решение некоторых первоочередных задач (накопление стартовой плазмы в центральной ловушке, стабилизация плазмы, отработка технологии нагрева плазмы нейтральными пучками) при соленоидальном включении секций сильного поля. Поэтому в данной работе установка работала только с магнитной конфигурацией, показанной в нижней части рис. 1. Магнитная система расширителей создает постепенно уменьшающееся поле с коэффициентом расширения $K = B_{\text{max}}/B_{\text{gun}} = 36$, где индекс gun соответствует координате анода плазменной пушки.

В описываемых экспериментах секции сильного поля включались в соленоидальной конфигурации с $B = 4.5$ Тл. Поле в средней плоскости центральной ловушки имело величину $B = 0.3$ Тл, таким образом, пробочное отношение равнялось 15. В типичном сценарии эксперимента центральная ловушка сначала заполняется низкотемпературной стартовой плазмой, которая гене-

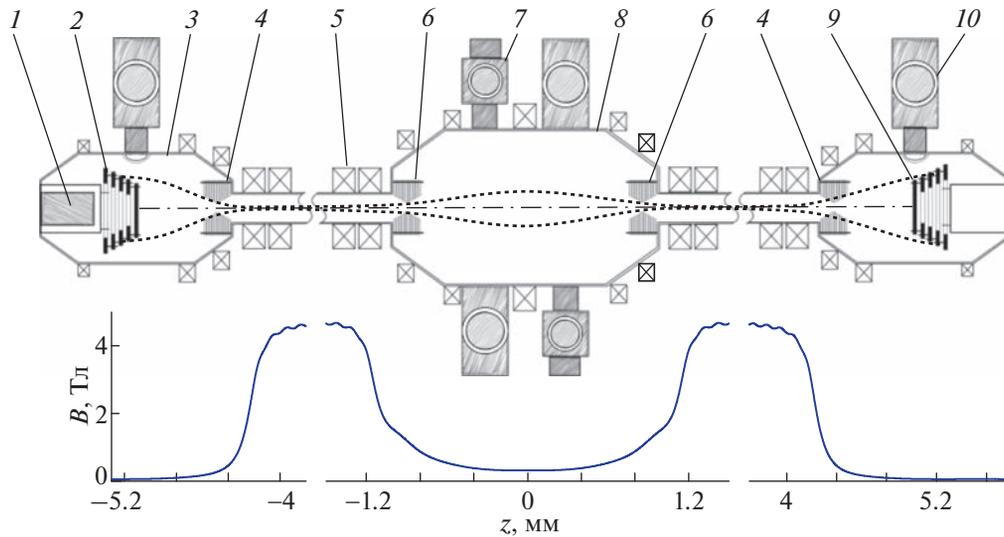


Рис. 1. Схема расположения внутрикамерных электродов в установке ГОЛ-NB (вид сверху) и профиль магнитной индукции вдоль оси: 1 — плазменная пушка, 2 — входной радиально-секционированный плазмодриемник, 3 — бак расширителя, 4 — лимитерные сборки в расширителях, 5 — катушка секции сильного поля, 6 — лимитерные сборки в центральной ловушке, 7 — инжектор быстрых атомов водорода, 8 — центральная ловушка, 9 — выходной радиально-секционированный плазмодриемник, 10 — модуль системы откачки. Пунктирной линией условно обозначена силовая линия, касающаяся внутренней апертуры всех лимитеров. Секции сильного поля, состоящие из 28 катушек каждая, показаны частично.

рируется дуговой плазменной пушкой [15]. При этом происходит постепенное уширение плазменного шнура в ловушке; к концу работы плазменной пушки плотность на оси достигает величины $n = 4 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ (см. [28]). Электронная температура стартовой плазмы в ловушке по данным зондовых измерений постепенно уменьшается от $T_e = 8\text{--}10 \text{ эВ}$ в начале разряда до $T_e = 5\text{--}6 \text{ эВ}$ к концу работы пушки. Два нейтральных пучка с $E = 25 \text{ кэВ}$ и суммарной мощностью до 1.1 МВт [29] инжектируются в плазму на $z = \pm 0.4 \text{ м}$ (продольная координата z отсчитывается от средней плоскости ловушки). Особенностью сценария описываемых экспериментов было практически одновременное включение плазменной пушки и нагревных нейтральных пучков. Это не является оптимальным с точки зрения эффективности захвата быстрых частиц плазмой, однако позволяет использовать нейтральные пучки в качестве диагностики плотности в течение всей длительности плазменного разряда.

Помимо использования нейтральных пучков для измерения плотности, изучение параметров плазмы производилось при помощи подвижного четырехэлектродного ленгмюровского зонда [30], расположенного вне зоны существования быстрых ионов на $z = 0.89 \text{ м}$ и позволяющего одновременно проводить измерения ионной плотности, электронной температуры и радиального электрического поля. Использовались также электрические зонды на $z = -0.89 \text{ м}$ и магнитные зонды

на $z = -0.4 \text{ м}$, спектроскопическая диагностика [31] на $z = 0.4 \text{ м}$, а также анализатор быстрых нейтралов перезарядки на $z = -0.4 \text{ м}$, подобный изготовленным для установок С-2 и MST [32].

Длительность существования плазмы до 5 мс ограничивается длительностью протекания тока в катушках сильного поля. Более подробное описание различных технических систем установки ГОЛ-NB приведено в [28].

3. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛОМ ПЛАЗМЫ

Система управления потенциалом плазмы установки ГОЛ-NB состоит из нескольких групп внутрикамерных электродов, которые показаны на рис. 1. Во время работы плазменной пушки существенный вклад в конфигурацию электрического поля в плазме вносит также катод пушки, потенциал которого выносится в плазму в приосевой области. Торцевые плазмодриемники (2 и 9 на рис. 1) представляют собой набор из пяти электродов с увеличивающимся радиусом. В левом из них сделано отверстие по оси, через которое проходит поток плазмы из пушки. Диаметр плазменного шнура ограничивается четырьмя сборками лимитеров (4 и 6 на рис. 1), расположенными в спадающем магнитном поле вблизи магнитных пробок вне области, в которой существует популяция быстрых ионов. Все внутрикамерные электроды изготовлены из молибдена для

Таблица 1. Основные параметры внутрикамерных электродов ГОЛ-NB

Наименование	z , м	B , Тл	D , мм	R	$D_{z=0}$, мм
Отверстие анода пушки	-5.29	0.122	45	36	29
Отверстие в центральном плазмодриемнике	-5.11	0.082	180	55	95
Среднее кольцо левого плазмодриемника	-5.14	0.089	500	50	276
Лимитеры расширителей	± 4.31	0.96	145	4.7	263
Лимитеры центральной ловушки	± 1.02	1.71	110	2.6	266
Среднее кольцо правого плазмодриемника	5.14	0.062	560	73	260

уменьшения вероятности образования униполярных электрических дуг. В качестве изоляторов используется керамика высокой плотности Al_2O_3 .

Форма и расположение торцевых пластин плазмодриемников, находящихся в расширителях магнитного поля и принимающих на себя вытекающую из ловушки плазму, а также геометрия плазменной пушки детально описаны в [15, 33]. Основными особенностями плазмодриемных пластин является их радиальная секционированность с непрерывным увеличением диаметров электрически изолированных дисков, к которым возможна индивидуальная подача потенциала. Лимитерные сборки установлены по обе стороны секций сильного поля. Они представляют собой наборы из 10 колец толщиной 0.5 мм с постепенно увеличивающимся диаметром внутреннего отверстия от центра сборки к ее краям. Два средних кольца электрически соединены. На них либо может подаваться потенциал от внешнего источника питания, либо эти электроды могут оставаться под плавающим потенциалом. Остальные электроды лимитерныхборок являются защитными. Во время работы установки они приобретают плавающий потенциал. Лимитерные сборки располагаются в магнитном поле масштаба 1 Тл. Из-за того, что катушки секции сильного поля включаются импульсно со временем нарастания тока около 13 мс, кольцевые электроды лимитерныхборок имеют радиальные разрезы для исключения возможности их разрушения в результате возбуждения вихревых токов.

Схема электрического подключения внутрикамерных электродов является компромиссом между задачей обеспечения устойчивости плазмы и задачей формирования максимального потока частиц стартовой плазмы из пушки в центральную ловушку. В табл. 1 приведены некоторые геометрические параметры внутрикамерных электродов: продольная координата, локальное магнитное поле B , локальное пробочное отношение $R = B_{\max}/B$, диаметр проекции силовой трубки на центр ловушки $z = 0$. Как видно, все лимитерные сборки установлены практически на одной магнитной поверхности с небольшим отклонением, магнитные потоки согласованы с точностью луч-

ше 2% (из-за разного времени нарастания токов в различных катушках магнитной системы и возникновения значительных вихревых токов по вакуумной камере абсолютно точное согласование в течение всей длительности эксперимента невозможно).

Внутренние лимитеры (расположенные в центральной ловушке) находятся в тени внешних (расположенных в расширителях) для исключения прямой электрической связи вдоль магнитного поля с торцевыми плазмодриемниками. Это связано с тем, что принятая для установки ГОЛ-NB техника вихревого удержания [23, 26] предполагает подачу разнополярных потенциалов на плазмодриемники и лимитеры центральной секции. Поэтому лимитеры в расширителях, имеющие плавающий потенциал, препятствуют протеканию прямого тока между плазмодриемниками и внутренними лимитерами. В свою очередь, только радиальная компонента тока, протекающего от лимитеров в центральной ячейке к плазмодриемникам, раскручивает плазму за счет силы Ампера. Радиальный шаг электродов лимитерныхборок в $\Delta r = 2$ мм выбран таким, чтобы ларморовский радиус ионов тепловой компоненты плазмы, имеющей в перспективе температуру в несколько десятков электронвольт, был в несколько раз меньше.

В настоящее время на установке реализована следующая схема коммутации питания к внутрикамерным электродам. Плазмодриемные пластины левого расширителя заземлены через резистивный делитель с равномерным шагом с сопротивлениями $R = 0.32$ Ом. Такая мера снижает вероятность переключения сильноточного разряда в плазменной пушке на корпус вакуумной камеры и улучшает эффективность генерации и транспортировки плазмы вдоль длинного солеоида. Потенциалы электродов плазмодриемника увеличиваются от края к оси. В настоящее время подключение пластин левого плазмодриемника является пассивным, потенциалы пластин определяются плазменными процессами. Конструкция установки позволяет при необходимости изменять распределение их потенциалов при помощи внешних источников питания. На пла-

стины правого плазмодриемника возможна подача независимо регулируемых отрицательных потенциалов в пределах 0–250 В. Обычно данные напряжения выставлялись с равномерным шагом с увеличением амплитуды к центральному диску. Подача положительных потенциалов в пределах 0–200 В на средние электроды внутренних лимитеров происходит синхронно до старта генератора плазмы и остается постоянной в течение разряда. Характерные диаграммы токов на все активные внутрикамерные электроды показаны на рис. 2. Как видно, амплитуды токов не превышают 100 А. Они сопоставимы по плотностям тока с токами ионного или электронного насыщения ленгмюровских зондов (в соответствии с полярностью приложенных потенциалов).

Система питания внутрикамерных электродов использует управляемые АС-DC источники мощностью до 1.5 кВт с гальванически-изолированными выходами, которые позволяют изменять выходное напряжение в пределах 15–55 В. Последовательное соединение пяти таких источников позволяет создавать полное напряжение на центральном электроде плазмодриемника системы от ± 15 до ± 275 В. Выходы всех источников подключены к конденсаторам емкостью 6.8 мФ для увеличения импульсной токоотдачи. Коммутация на нагрузку осуществляется IGBT-ключами, имеющими достаточный запас по коммутируемому току. Для управления выходным напряжением источника и таймингом включения транзисторов была создана схема на основе платы с 32-разрядным микроконтроллером STM32F407, имеющим архитектуру Cortex M4. В первую очередь она управляет выходными напряжениями АС-DC источников через гальванически изолированные каналы цифро-аналоговых преобразователей. Микроконтроллер также управляет включением/выключением и контролем состояния АС-DC источников. Измерение аналоговых сигналов, соответствующих величине выходного напряжения и протекающего тока, реализовано на базе этой же платы. Это позволило сделать самодостаточную систему с уменьшенными наводками на измерительные каналы. Связь с системой управления и сбора данных установки осуществляется по сети Ethernet 1000base-T.

4. ВЛИЯНИЕ ПОТЕНЦИАЛОВ НА ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ

Положительное влияние отрицательного потенциала плазмодриемника на эффективность транспортировки плазмы вдоль секции сильного поля ранее уже было показано в экспериментах на стартовой конфигурации ГОЛ-NB [33]. Поэтому основной задачей представленных экспериментов было определение оптимального режима работы всей системы внутрикамерных электро-

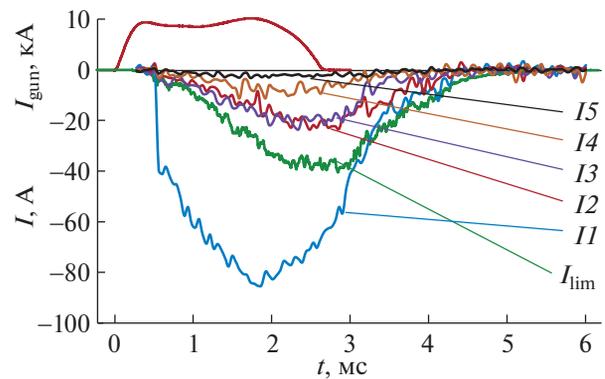


Рис. 2. Подборка типичных сигналов, характеризующих работу систем питания внутрикамерных электродов. Ток плазменной пушки приведен в качестве масштаба по времени, радиальные сегменты плазмодриемника пронумерованы от центра к краю 11–15. Токи плазменной пушки I_{gun} и лимитеров I_{lim} для наглядности показаны с обратной полярностью.

дов, в первую очередь лимитеров. На рис. 3 приведены типичные сигналы при разных потенциалах лимитеров. Во всех случаях потенциал правых торцевых плазмодриемников был равным $U_r = -200$ В. Здесь и далее для обозначения режима работы установки мы будем использовать величину напряжения, задаваемого источником питания. Реальный потенциал, вводимый в плазму, изменяется в течение длительности разряда из-за падения части потенциала на защитном резисторе, ограничивающим ток при пробое, а также из-за изменения падения потенциала в ленгмюровском слое из-за изменения параметров приповерхностной плазмы со временем. На верхней части рисунка приведены ток разряда плазменной пушки и суммарный ток на лимитеры центральной секции. На рисунке показаны эволюция тока на правый выходной плазмодриемник, а также токи прошедших быстрых атомов, регистрируемые по центральной хорде. Видно, что с ростом величины положительного потенциала лимитеров происходит улучшение захвата нагревных пучков. Это показывает, что в ловушке происходит более значительное накопление плотности стартовой плазмы при подаче положительного потенциала на лимитеры. Заметная разница в токах на лимитеры при потенциалах $U_{\text{lim}} = +100$ и $+200$ В не приводит к дополнительному увеличению захвата пучков, несмотря на увеличение тока на лимитеры. Необходимо заметить, что вводимая электрическая мощность через лимитеры $U_{\text{lim}} I_{\text{lim}} \approx 5\text{--}10$ кВт является достаточно малой, чтобы существенно повлиять на параметры плазмы в ловушке.

Сигналы, показанные на рис. 3д показывают динамику выхода быстрых атомов, получающих

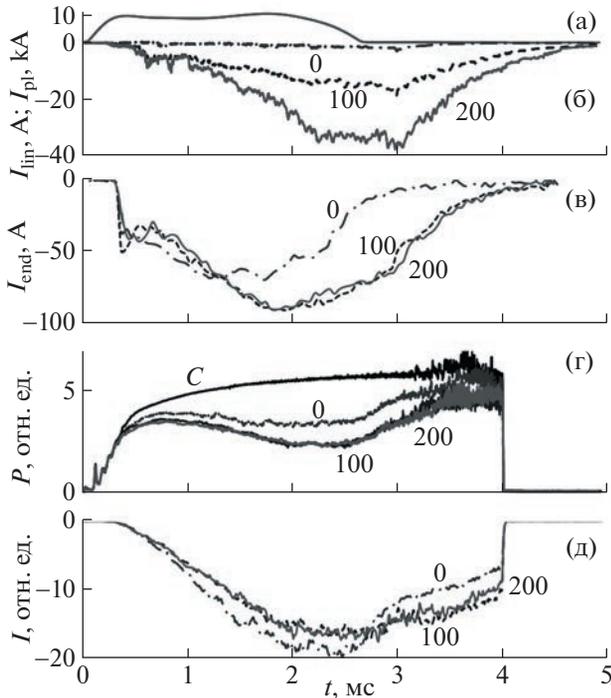


Рис. 3. Сигналы при различных потенциалах лимитеров в центральной ловушке (метки у кривых соответствуют потенциалу в вольтах): ток разряда в плазменной пушке (а), суммарный ток двух лимитеров в центральной ловушке (б), ток центральной секции выходного плазмодоступа (в), плотность тока нагревающего нейтрального пучка, прошедшего сквозь вакуумную камеру (г) (C – сигнал в контрольном эксперименте без плазмы; чем меньше сигнал с плазмой, тем лучше коэффициент захвата пучка), поток нейтралов перезарядки в канале 25 кэВ (д).

ся при перезарядных потерях захваченных быстрых протонов (канал анализатора с энергией 25 кэВ). Данная величина пропорциональна трем параметрам плазменного образования в точке инжекции:

$$P \propto I_b n_g \int n dr,$$

где I_b – эквивалентный ток инжектируемого пучка, n_g – плотность газа в области удержания быстрых протонов, интегрирование ведется вдоль хорды наблюдения. Из рисунка видно следующее. При заземленных лимитерах наблюдается более высокая плотность нейтрального газа по сравнению с режимом, при котором на лимитер подается положительный потенциал. Кроме этого, распад плазмы после выключения плазменной пушки при заземленном лимитере происходит быстрее, чем при отрицательном потенциале лимитеров.

Радиальное распределение потенциала в плазме центральной ловушки измерялось при помощи обычного цилиндрического электрического

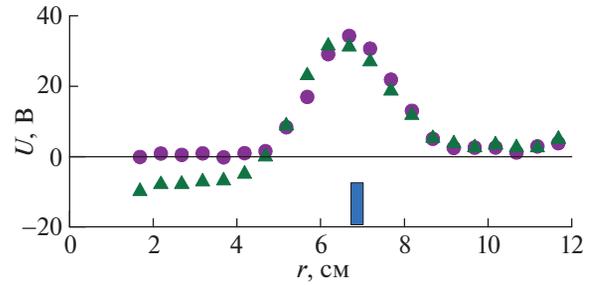


Рис. 4. Потенциал электростатического зонда на $z = 0.89$ м относительно корпуса установки, приведенный для моментов времени $t = 2$ мс (кружки) и $t = 3$ мс (треугольники). Прямоугольник на координатах 6.7–7 см условно показывает проекцию радиального положения кольца лимитера, на которое подается потенциал.

зонда длиной 4 мм. Зонд мог перемещаться по радиусу на отрезке длиной 102 мм. Измерялся плавающий потенциал зонда, который, как известно, отличается от потенциала плазмы на величину перепада потенциала в ленгмюровском слое. На рис. 4 показаны радиальные профили при потенциале лимитеров $U_{lim} = 100$ В, соответствующие двум типичным моментам времени: стадии накопления плазмы (2 мс) и стадии распада (3 мс). Видно, что вблизи лимитера действительно формируется слой с изменяющимся электрическим полем, в котором должно происходить дифференциальное вращение плазмы из-за $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ дрейфа. Непосредственного измерения скорости вращения плазмы в этой точке в настоящее время нет, однако ее можно оценить по измеренной величине радиального электрического поля. В данном режиме работы установки величина $E_r \approx 20$ В/см на $r \approx 5.5$ см, что дает скорость $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ дрейфа на этом радиусе $v_\phi \approx 1.7 \times 10^5$ см/с и угловую скорость вращения плазмы $\omega \approx 3 \times 10^4$ с $^{-1}$. При удалении от области максимального градиента потенциала электрическое поле и скорость дрейфового вращения уменьшаются, в залимитерной области плазмы – вращается в противоположную сторону.

Потенциал в залимитерной области формируется самосогласованно в результате того, что редкая залимитерная плазма опирается на радиально-секционированные защитные электроды лимитерной сборки, которые приобретают плавающий потенциал. Поведение потенциала в центральной части плазменного шнура отличается на стадии распада от стадии накопления плазмы. Как видно из рис. 4, потенциал приосевой области в центральной ловушке близок к нулю во время работы плазменной пушки. Он определяется хорошим электрическим контактом плазмы с эмитирующей плотной прианодной плазмой

сильноточного разряда в пушке. После прекращения разряда в плазменной пушке и ухудшения проводимости на этот торец установки, потенциал плазмы в ловушке начинает определяться трансляцией потенциала со стороны выходного плазмоприемника. При этом центральная область плазмы приобретает отрицательный потенциал и зона дифференциального вращения расширяется. Заметим, что в данном режиме падение напряжения на защитных резисторах в цепи питания находится в пределах 5–10 В. Падение потенциала в ленгмюровском слое у электродов и у зонда можно оценить как $\Delta\phi \approx 3.3 T_e/e \approx 20$ В. Таким образом, можно говорить о разумном согласии измеренного потенциала в максимуме кривых на рис. 4 с величиной напряжения, задаваемого источником питания.

Детальное рассмотрение поведения токов на лимитеры и плазмоприемники дает возможность количественно охарактеризовать время существования плазмы в ловушке после выключения плазменной пушки. В этот период времени плотность плазмы быстро снижается и диагностика плотности по ослаблению нейтральных пучков становится крайне неточной. Внутрикамерные электроды можно рассматривать как макроскопические ленгмюровские зонды. Тогда ионный ток собирается плазмоприемником, а электронный — лимитерами, в пределах соответствующих магнитных поверхностей. В этой связи, для уменьшения влияния вольт-амперной характеристики, на рис. 5 представлены сигналы этих токов, нормированные на максимальное их значение в конкретном эксперименте. Как видно из рис. 5а, после выключения разряда плазменной пушки в $t_0 = 2.7$ мс ток на лимитеры экспоненциально спадает. При этом показатель экспоненты в области $t = 2.7\text{--}4$ мс существенно зависит от величины потенциалов плазмоприемника и лимитеров. Такое поведение тока на лимитеры можно интерпретировать как увеличение времени удержания плазмы в центральной ловушке.

Зависимость времени спада тока на лимитеры от величины потенциала плазмоприемника показана на рис. 6а. В заданном режиме потенциал лимитеров был в пределах $U_{\text{lim}} = 100\text{--}150$ В. Приведенные погрешности соответствуют дисперсии измеренных значений в серии выстрелов. Как видно, данное время, в оптимальных условиях подачи потенциалов, уже по порядку величины сопоставимо с оценкой времени газодинамического удержания: $\tau \sim RL/2c_s \sim 0.5$ мс, где $R = 15$ — пробочное отношение, L — длина ловушки, c_s — звуковая скорость. На рис. 6б представлено поведение величины отношения амплитуды тока плазмоприемника в $t = 4$ мс к максимальному току. Чем выше данный показатель, тем более эффективно удерживается плазма в ловушке после

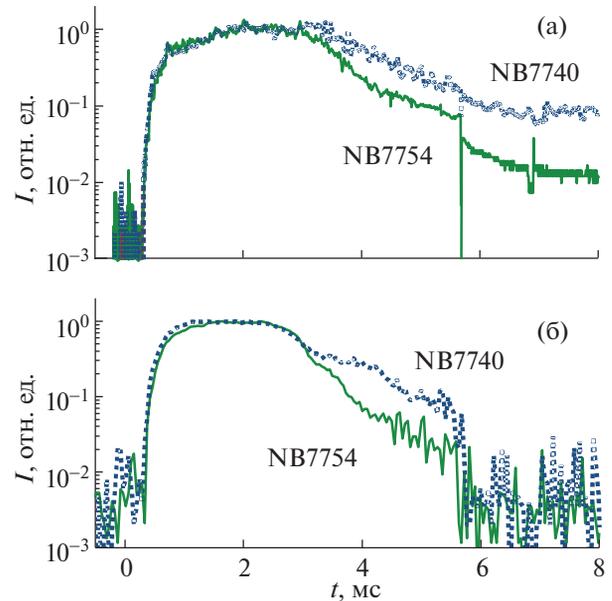


Рис. 5. Нормированные на максимальную амплитуду суммарный ток лимитеров (а) и правого центрального плазмоприемника (б) при различных установленных потенциалах: эксперимент NB7754 — $U_{\text{lim}} = +50$ В, $U_r = -250$ В; эксперимент NB7740 — $U_{\text{lim}} = +100$ В, $U_r = -120$ В. Скачок сигналов в области $t = 5.7$ мс соответствует выключению подачи потенциалов на плазмоприемник.

отключения тока разряда в плазменной пушке и исчезновения стабилизирующего влияния замороженности силовых линий в плазменную пушку.

Результатом данной серии экспериментов стало определение оптимальных значений потенциалов лимитеров $U_{\text{lim}} = 100$ В и плазмоприемников $U_r = -120$ В. Именно в сравнении с данным оптимальным режимом работы были проведены дальнейшие эксперименты по выявлению влияния подачи напряжения на поведение локальных параметров плазмы.

В первую очередь была проведена серия экспериментов по измерению локальных флуктуаций плотности плазмы в сечении центральной ловушки в области между точкой остановки быстрых протонов и лимитерами. В данное сечение был установлен подвижный двойной ленгмюровский зонд, перемещавшийся по радиусу в паузах между экспериментами. Зависимость тока насыщения зонда, находившегося на оси плазмы, от потенциала лимитера показана на рис. 7. В данных экспериментах потенциал плазмоприемников был $U_r = -150$ В. Как видно из приведенных сигналов, подача положительного потенциала на лимитеры приводит к увеличению плотности плазмы и длительности ее удержания. Сигналы токов насыщения зонда являются достаточно шумными, амплитуда шумов также зависит от приложенного

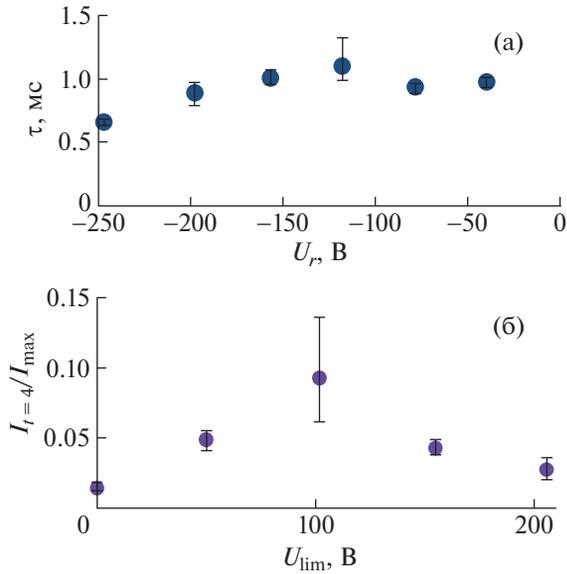


Рис. 6. Зависимость времени экспоненциального затухания тока на лимитеры после выключения плазменной пушки от амплитуды напряжения на плазмодриемнике (а); зависимость отношения величины тока на плазмодриемнике в $t = 4$ мс к максимальному току от величины напряжения на лимитере (б). Погрешности соответствуют дисперсии измеренных значений в серии экспериментов.

потенциала. На рис. 7б и в приведена спектрограмма Фурье по бегущему окну длительностью 0.25 мс. Из данных диаграмм видно два факта. Во-первых, наблюдается снижение амплитуды высокочастотных мод при подаче положительного потенциала на лимитеры. Во-вторых, на сигналах при выключении тока разряда плазменной пушки в области $t \approx 2.5\text{--}3$ мс проявляются квазигармонические осцилляции на частоте $f \approx 13$ кГц и ее гармониках. При заземленных лимитерах $U_{\text{lim}} = 0$ данные колебания периодически возникают даже в течение разряда пушки, а после ее выключения – несколько раньше, чем при положительном потенциале лимитеров. Это косвенно свидетельствует о более сильной МГД-активности, приводящей к быстрой потере вещества поперек магнитного поля в отсутствие потенциала на лимитерах.

Для дальнейшей диагностики поведения заливочной плазмы использовался электростатический зонд, позволяющий регистрировать разность плавающих потенциалов между двумя электродами, смещенными по азимуту на 1 см. Измерительная головка зонда располагалась глубоко в тени диафрагм на $z = -0.89$ м и $r = 115$ мм, что соответствует расстоянию до последней магнитной поверхности, проходящей через лимитеры, $\Delta r = 100$ мм в пересчете на величину магнитного поля в средней плоскости центральной

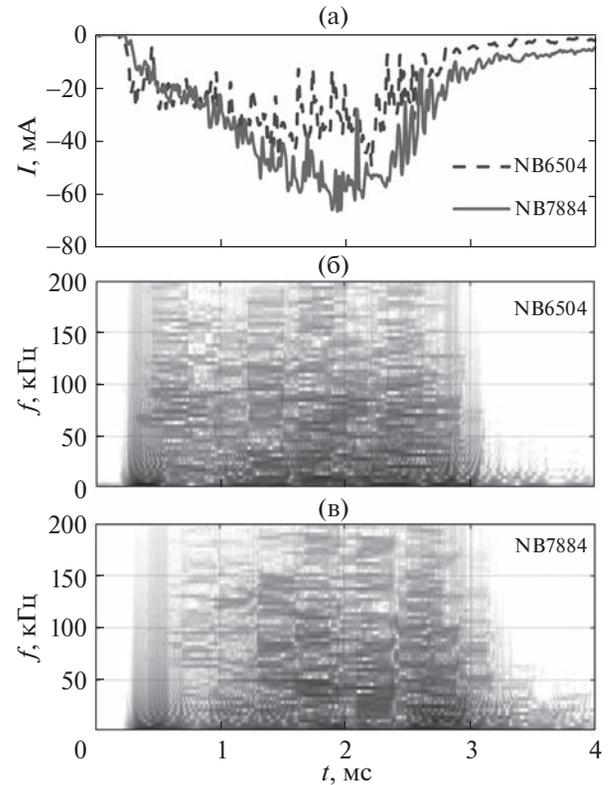


Рис. 7. Сигналы двойного ленгмюровского зонда (а), расположенного в центральной ловушке на $z = 0.89$ м при потенциалах лимитеров 0 (NB6504) и +100 В (NB7884) в экспериментах без инъекции нейтральных пучков; спектрограммы сигналов тока ленгмюровского зонда для экспериментов NB6504 и NB7884 (интенсивность цвета соответствует амплитуде гармоники; масштаб логарифмический) (б, в).

ловушки. Механически электроды зонда представляют собой проволочки из торированного вольфрама диаметром 0.1 мм и длиной 4 мм. Измерение разности потенциалов производится через подавляющий синфазные наводки дифференциальный усилитель с аналоговой полосой $f < 13$ МГц. Сигналы зонда, пересчитанные в азимутальное электрическое поле, приведены на рис. 8 для случаев оптимального режима подачи потенциалов на внутрикамерные электроды (эксперимент NB7444) и при заземленных лимитерах (эксперимент NB7442). Там же показан модовый состав колебаний азимутального поля. Спектрограммы вычислялись при помощи быстрого преобразования Фурье в бегущем окне длительностью 0.25 мс. Основным выводом из приведенных спектрограмм является то, что в вылетающей поперек магнитного поля плазме заметная амплитуда флуктуаций наблюдается только в низкочастотной области. Так же, как и на диаграммах сигналов Ленгмюровского зонда на рис. 7, присутствуют флуктуации в области частоты

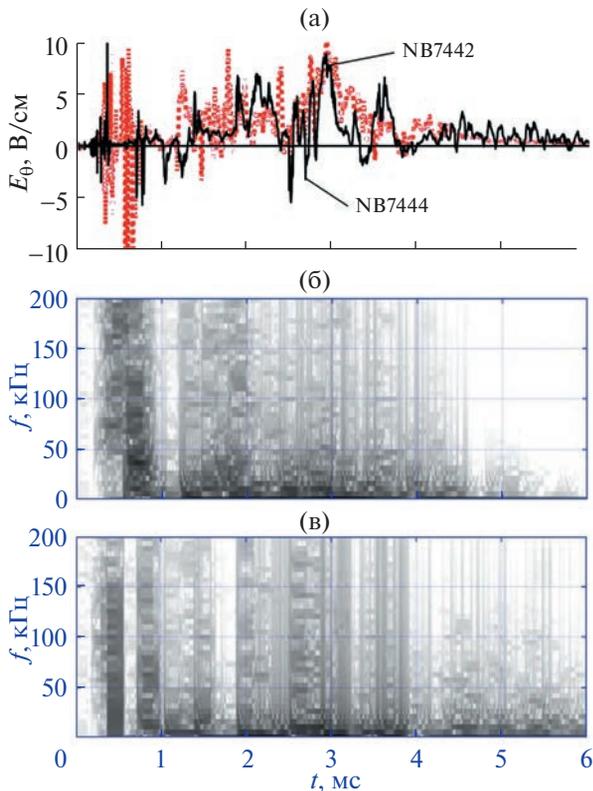


Рис. 8. Напряженность азимутального электрического поля E_0 в тени лимитера (проекция радиуса в центральную плоскость $R = 23$ см) при разных потенциалах $U_{\text{lim}} = 0$ (NB7442) и $U_{\text{lim}} = 100$ В (NB7444) (а); модовый состав колебаний азимутального электрического поля по сигналам рисунка а в эксперименте NB7442 (чем темнее, тем выше амплитуда гармоники; масштаб логарифмический) (б); эксперимент NB7444 (в).

$f = 10$ кГц и ее ближайших гармоник. В дополнение можно заметить, что при подаче оптимального потенциала на лимитеры, амплитуда азимутального электрического поля несколько меньше, спектр колебаний уже, а длительность сигнала дольше. Это свидетельствует о меньшей МГД-активности плазмы в периферийной области. Средняя амплитуда напряженности азимутального электрического поля для приведенных выстрелов, в случае с оптимальными потенциалами на лимитерах, на $\sim 30\%$ меньше, чем при заземленных. Это качественно согласуется с увеличением захвата пучков, показанным на рис. 3.

5. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На установке ГОЛ-NB была создана, протестирована и введена в эксплуатацию система создания радиального электрического поля в плазме, которое необходимо для формирования слоя дифференциального вращения вокруг оси в ре-

зультате дрейфа в скрещенных электрическом и магнитном полях. Это необходимо для ограничения амплитуды перестановочных неустойчивостей по технологии вихревого удержания [23, 26], которые в противном случае приводят к большим поперечным потерям плазмы. Система состоит из пятиэлектродных радиально-секционированных торцевых плазмоприемников, двух сборок лимитеров в центральной ловушке, двух сборок лимитеров в баках расширителей, управляемых источников питания и средств измерения величины токов и подаваемых потенциалов. Проведены первые эксперименты по оптимизации подачи потенциалов на данные системы. Экспериментально показано улучшение динамики захвата инжектируемых быстрых атомов водорода, а также уменьшение флуктуаций локальных параметров плазмы в центральной секции ловушки при подаче оптимальных напряжений на внутрикамерные электроды. Важно, что наибольшие улучшения в параметрах плазмы наблюдаются после прекращения работы плазменной пушки, когда исчезает стабилизация вмороженностью силовых линий магнитного поля в проводящий торец сильнооточного разряда в пушке.

В представленных экспериментах геометрия электродов, полярности и величины потенциалов соответствуют ожидавшимся из теории вихревого удержания и экспериментов на установке ГДЛ [26], на которые авторы опирались при проектировании установки ГОЛ-NB. Оптимум по потенциалам электродов является достаточно плавным (см. рис. 5), однако улучшение времени жизни плазмы в ловушке после прекращения стабилизации вмороженностью силовых линий является значимым. При увеличении напряжения выше оптимального наблюдается деградация удержания, которая прогнозируется в теории [23, 26] из-за растущей дестабилизирующей роли неустойчивости Кельвина–Гельмгольца. Отметим, что в теории вихревого удержания важную стабилизирующую роль играет популяция быстрых ионов, образующаяся при захвате нейтральных частиц нагретых пучков. В первых экспериментах с нейтральной инжекцией на ГОЛ-NB [34], наблюдались потери быстрых ионов из-за перезарядки, в результате чего плотность популяции быстрых ионов и температура плазмы были ниже расчетных. По мере увеличения температуры плазмы и плотности популяции быстрых ионов величины потенциалов для оптимума по удержанию должны увеличиваться, поэтому имеющийся резерв систем питания по напряжению может быть восстановлен.

В заключение отметим еще одно обстоятельство. Любой реальный эксперимент является достаточно сложной системой, в которой одновременно происходят различные процессы. Часто изменение одного из параметров эксперимента

приводит к изменению сразу нескольких процессов, причем вклад каждого из них в изменение итогового результата трудно либо невозможно вычленивать. Одним из таких процессов является продольный ток, протекающий по плазме. Величина этого тока зависит от приложенных напряжений — см. рис. 3. Ранее мы уже упоминали омическую мощность, выделяемую протекающим током и несколько модифицирующую параметры плазмы. Другим эффектом протекающего тока является появление глобального азимутального магнитного поля. Как хорошо известно, в линейной системе предельная величина продольного тока по критерию [35, 36] определяется выражением (в единицах системы СИ):

$$q = \frac{2\pi a B_z}{L B_\theta} = \frac{(2\pi a)^2 B_z}{\mu_0 L I} > 1,$$

где q — запас устойчивости, B_z и B_θ — аксиальная и азимутальная компоненты магнитного поля, a и L — радиус и длина плазмы, μ_0 — магнитная постоянная, I — полный ток по плазме. Для параметров установки ГОЛ-NB предельно допустимый продольный ток превышает 15 кА, что многократно превосходит величину тока в данном эксперименте. В этой работе мы изучали работу системы внутрикамерных электродов при симметричном подключении. Возможно также несимметричное подключение, при котором на лимитеры будут подаваться разные потенциалы и между ними будет дополнительно формироваться продольный ток. Тогда, помимо шира вращения, будет возникать и шир магнитного поля, который также является стабилизирующим фактором [37]. Поскольку потенциалы лимитеров и плазмодриемников устанавливаются независимо и имеют разную полярность, то в принципе возможна ситуация, при которой направления тока вблизи оси плазмы и на периферии будут противоположными. Ранее в экспериментах на установке ГОЛ-3 было показано [38], что подобная конфигурация может обеспечивать МГД-стабилизацию неустойчивой по критерию [1] конфигурации даже при $q < 1$ на оси системы. Ток, протекающий по периферии системы с низкой плотностью, будет также служить дополнительным источником омического нагрева в этой области. Подобный режим сильноточной работы кольцевых электродов используется в экспериментах на установке С-2W [39].

Во время рецензирования этой статьи вышла из печати статья о физическом базисе установки ВНАМ [40], в которой описана система электродов, предназначенных для такого же способа стабилизации плазмы за счет формирования слоя дифференциального вращения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что не имеют конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rosenbluth M.N., Longmire C.L.* // *Ann. Phys.* 1957. V. 1. P. 120. [https://doi.org/10.1016/0003-4916\(57\)90055-6](https://doi.org/10.1016/0003-4916(57)90055-6)
2. *Рютов Д.Д., Ступаков Г.В.* // *Письма ЖЭТФ.* 1977. Т. 26. С. 186.
3. *Ryutov D.D., Berk H.L., Cohen B.I., Molvik A.W., Simonen T.C.* // *Phys. Plasmas.* 2011. V. 18. P. 092301. <https://doi.org/10.1063/1.3624763>
4. *Буджер Г.И., Мирнов В.В., Рютов Д.Д.* // *Письма ЖЭТФ.* 1971. Т. 14. С. 320.
5. *Logan B.G., Lichtenberg A.J., Lieberman M.A., Makhijani A.* // *Phys. Rev. Lett.* 1972. V. 28. P. 144. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.28.144>
6. *Mirnov V.V., Lichtenberg A.J.* // *Rev. Plasma Physics.* V. 19 / Ed. B.V. Kadomtsev. New York, 1996. P. 53.
7. *Бурдаков А.В., Поступаев В.В.* // *УФН.* 2018. Т. 188. С. 651. <https://doi.org/10.3367/UFN.2018.03.038342>
8. *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>
9. *Сковородин Д.И., Черноштанов И.С., Амиров В.Х., Астрелин В.Т., Багрянский П.А., Беклемишев А.Д., Бурдаков А.В., Горбовский А.И., Котельников И.А., Магомедов Э.М., Полосаткин С.В., Поступаев В.В., Приходько В.В., Савкин В.Я., Солдаткина Е.И., Соломахин А.Л., Сорокин А.В., Судников А.В., Христо М.С., Шиянков С.В., Яковлев Д.В., Щербаков В.И.* // *Физика плазмы.* 2023. Т. 49. С. 831. <https://doi.org/10.31857/S0367292123600322>
10. *Postupaev V.V., Burdakov A.V., Ivanov A.A.* // *Fusion Sci. Technol.* 2015. V. 68. P. 92. <https://doi.org/10.13182/FST14-846>
11. *Поступаев В.В., Юров Д.В.* // *Физика плазмы.* 2016. Т. 42. С. 966. <https://doi.org/10.7868/S036729211611007X>
12. *Postupaev V.V., Batkin V.I., Beklemishev A.D., Burdakov A.V., Burmasov V.S., Chernoshтанov 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>
13. *Prater R.* // *Phys. Fluids.* 1974. V. 17. P. 193. <https://doi.org/10.1063/1.1694587>
14. *Molvik A.W., Breun R.A., Golovato S.N., Hershkowitz N., McVey B., Post R.S., Smatlak D., Yujiri L.* //

- Phys. Fluids. 1984. V. 27. P. 2711.
<https://doi.org/10.1063/1.864575>
15. *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>
 16. *Shaing K.C., Crume Jr E.C.* // Phys. Rev. Lett. 1989. V. 63. P. 2369.
 17. *Biglari H., Diamond P.H., Terry P.W.* // Phys. Fluids B. 1990. V. 2. P. 1.
<https://doi.org/10.1063/1.859529>
 18. *Taylor T.S.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 1997. V. 39. P. B47.
<https://doi.org/10.1088/0741-3335/39/12B/005>
 19. *Burrell K.H.* // Phys. Plasmas. 1997. V. 4. P. 1499.
<https://doi.org/10.1063/1.872367>
 20. *Cho T., Yoshida M., Kohagura J., Hirata M., Numakura T., Higaki H., Hojo H., Ichimura M., Ishii K., Islam K.Md., Itakura A., Katanuma I., Nakashima Y., Saito T., Tatematsu Y., Yoshikawa M., Kojima Y., Tokioaka S., Yokoyama N., Tomii Y., Imai T., Pastukhov V.P., Miyoshi S., and GAMMA 10 Group* // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 94. P. 085002.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.94.085002>
 21. *Severn G.D., Hershkowitz N., Breun R.A., Ferron J.R.* // Phys. Fluids B. 1991. V. 3. P. 114.
<https://doi.org/10.1063/1.859948>
 22. *Sakai O., Yasaka Y., Itatani R.* // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 70. P. 4071.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.70.4071>
 23. *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>
 24. *Schmitz L., Fulton D., Ruskov E., Lau C., Deng B.H., Tajima T., Binderbauer M.W., Holod I., Lin Z., Gota H., Tuszewski M., Dettrick S.A., Steinhauer L.C.* // Nat. Commun. 2016. V. 7. P. 13860.
<https://doi.org/10.1038/ncomms13860>
 25. *Sudnikov A.V., Beklemishev A.D., Postupaev V.V., Burdakov A.V., Ivanov I.A., Vasilyeva N.G., Kuklin K.N., Sidorov E.N.* // Fusion Eng. Design. 2017. V. 122. P. 86.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.09.005>
 26. *Beklemishev A.D.* // AIP Conf. Proc. 2008. V. 1069. P. 3.
<https://doi.org/10.1063/1.3033729>
 27. *Pastukhov V.P., Chudin V.N.* // Fusion Sci. Technol. 2011. V. 59 (1T). P. 84.
<https://doi.org/10.13182/FST11-A11580>
 28. *Postupaev V.V., Batkin V.I., Burdakov A.V., Burmasov V.S., Ivanov I.A., Kuklin K.N., Lykova Yu.A., Melnikov, N.A., Mекler 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>
 29. *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>
 30. *Sidorov E.N., Batkin V.I., Burdakov A.V., Ivanov I.A., Kuklin K.N., Mекler 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>
 31. *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>
 32. *Polosatkin S., Belykh V., Davydenko V., Clary R., Fiksel G., Ivanov A., Kapitonov V., Liu D., Mishagin V., Titunov M., Voskoboinikov R.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2013. V. 720. P. 42.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.12.039>
 33. *Postupaev V.V., Batkin V.I., Burdakov A.V., Burmasov V.S., Ivanov I.A., Kuklin K.N., Mекler 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>
 34. *Поступаев В.В., Баткин В.И., Бурдаков А.В., Бурмасов В.С., Иванов И.А., Куклин К.Н., Лыкова Ю.А., Меклер К.И., Мельников Н.А., Никишин А.В., Полосаткин С.В., Ровенских А.Ф., Сидоров Е.Н., Скляров В.Ф., Сквородин Д.И.* // Физика плазмы. 2022. Т. 48. С. 1005.
<https://doi.org/10.31857/S0367292122600340>
 35. *Шафранов В.Д.* // Атомная энергия. 1956. Т. 1. С. 38.
 36. *Kruskal M.D., Johnson J.L., Gottlieb M.B., Goldman L.M.* // Phys. Fluids. 1958. V. 1. P. 421.
<https://doi.org/10.1063/1.1724359>
 37. *Suydam B.R.* // Proc. Second U. N. Internat. Conf. on Peaceful Uses of Atomic Energy (Geneva, 1958). 1958. V. 31. P. 354.
 38. *Burdakov A.V., Postupaev V.V., and Sudnikov A.V.* // Phys. Plasmas. 2014. V. 21. P. 052507.
<https://doi.org/10.1063/1.4876745>
 39. *Gota H., Binderbauer M.W., Tajima T., Putvinski S., Tuszewski M., Deng B.H., Dettrick S.A., Gupta D.K., Korepanov S., Magee R.M., Roche T., Romero J.A., Smirnov A., Sokolov V., Song Y., Steinhauer L.C., Thompson M.C., Trask E., Van Drie A.D., Yang X., Yushmanov P., Zhai K., Alfrey I., Andow R., Barraza E., Beall M., Bolte N.G., Bomgardner E., Ceccherini F., Chirumamilla A., Clary R., DeHaas T., Douglass J.D., DuBois A.M., Dunaevsky A., Fallah D., Feng P., Finucane C., Fulton D.P., Galeotti L., Galvin K., Granstedt E.M., Griswold M.E., Guerrero U., Gupta S., Hubbard K., Isakov I., Kinley J.S., Korepanov A., Krause S., Lau C.K., Leinweber H., Leuenberger J., Lieurance D., Madrid M., Madura D., Matsumoto T., Matvienko V., Meekins M., Mendoza R., Michel R., Mok Y., Morehouse M., Nations M., Necas A., Onofri M., Osin D., Ottaviano A., Parke E., Schindler T.M., Schroeder J.H., Sevier L., Sheftman D., Sibley A., Signorelli M., Smith R.J., Slepchenkov M., Snitchler G., Titus J.B., Ufnal J., Valentine T., Waggoner W., Walters J.K., Weixel C., Wollenberg M., Ziaei S., Schmitz L., Lin Z., Ivanov A.A., Asai T., Baltz E.A., Platt J.C., and the TAE Team* // Nucl. Fusion. 2019. V. 59. P. 112009.
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab0be9>
 40. *Endrizzi D., Anderson J.K., Brown M., Egedal J., Geiger B., Harvey R.W., Ialovega M., Kirch J., Peterson E., Petrov Yu.V., Pizzo J., Qian T., Sanwalka K., Schmitz O., Wallace J., Yakovlev D., Yu M., Forest C.B.* // J. Plasma Phys. 2023. V. 89. P. 975890501.
<https://doi.org/10.1017/S0022377823000806>