

НОВЫЕ УСТАНОВКИ

УДК 533.9.07

ПЛАЗМЕННАЯ СИСТЕМА УСТАНОВКИ ГОЛ-3Т

© 2015 г. А. В. Аржанников^{*,**}, А. В. Бурдаков^{*,***}, В. С. Бурмасов^{*,**}, И. А. Иванов^{*,**},
С. А. Кузнецов^{**}, К. Н. Куклин^{*}, К. И. Меклер^{*}, С. В. Полосаткин^{*,**},
В. В. Поступаев^{*,**}, А. Ф. Ровенских^{*}, С. Л. Синицкий^{*,**}, В. Ф. Скляр^{*,**}

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

*** Новосибирский государственный университет, Россия*

**** Новосибирский государственный технический университет, Россия*

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

Поступила в редакцию 14.05.2015 г.

Приведено описание плазменной системы и диагностик новой установки ГОЛ-3Т. Эта установка является итогом первого этапа глубокой реконструкции многопробочной ловушки ГОЛ-3, работавшей в Институте ядерной физики СО РАН им. Г.И. Будкера с 1988 г. Планом реконструкции предполагается создание на площадке многопробочной ловушки ГОЛ-3 двух новых независимых установок. Установка ГОЛ-3Т была оптимизирована для проведения исследований по физике пучково-плазменного взаимодействия и генерации электромагнитного излучения субтерагерцового диапазона при коллективной релаксации мощного релятивистского электронного пучка, имеющего длительность 5–10 мкс. Исследования по физике многопробочного удержания плазмы в осесимметричных магнитных ловушках будут продолжены в новом диапазоне параметров эксперимента на второй установке, получившей название ГОЛ-NB.

DOI: 10.7868/S0367292115110013

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования процессов, возникающих при коллективной релаксации электронного пучка в плазме, занимают важное место в физике плазмы. Подобные процессы определяют свойства и поведение плазмы в таких далеких по параметрам областях, как динамика звездных атмосфер или нагрев термоядерных мишеней в схеме “быстрого поджига”. Лабораторные исследования по данной тематике отличаются значительной вариацией основных параметров, начиная от стационарных слаботочных электронных пучков, инжектируемых в редкую газоразрядную плазму, и заканчивая сверхмощными импульсными релятивистскими электронными пучками с мегаамперными токами. Установка ГОЛ-3, действующая в новосибирском Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН с 1988 г., является одной из крупнейших установок, предназначенных для экспериментов по пучково-плазменной тематике.

Основной научной задачей, которая ставилась при сооружении установки ГОЛ-3, являлся поиск условий для быстрого коллективного нагрева плазмы, удерживаемой в многопробочной ловушке. Проект установки ГОЛ-3 был основан на имеющемся понимании физики пучково-плазменного взаимодействия, которое было получено

в нескольких экспериментах небольшого масштаба с релятивистскими электронными пучками, имевшими длительность 30–100 нс и полное энергосодержание масштаба 1 кДж. При сооружении установки ГОЛ-3 было принято решение сохранить удельные параметры электронного пучка и плазмы, но существенно, на два порядка величины, увеличить длительность и энергосодержание пучка. Проектными параметрами первой очереди установки ГОЛ-3 стали следующие [1]: плотность плазмы 10^{21} м^{-3} , длина плазменного столба 7 м, диаметр плазмы 8 см, ведущее магнитное поле соленоида до 6 Тл, энергия электронов до 1 МэВ, ток электронного пучка до 30 кА, длительность пучка 3–6 мкс, полное энергосодержание более 100 кДж. В дальнейшем в ходе модернизации установки, длина соленоида была увеличена до 12 м, длительность и энергосодержание электронного пучка – до 8–12 мкс и 200 кДж, соответственно [2]. На этом этапе в качестве генератора релятивистского пучка стал использоваться ускоритель У-2 с мегавольтным ленточным диодом [3].

Уникальные технические возможности установки ГОЛ-3 позволили существенно расширить область исследований по сравнению с первоначальными планами. Установка работала по следующим научным направлениям:

- 1) физика пучково-плазменного взаимодействия [4–7];
- 2) физика многопробочного удержания плазмы [8–11];
- 3) воздействие мощных потоков электронно-горячей плазмы на материалы первой стенки вплоть до нагрузок, соответствующих большому срыву в токамаках реакторного класса [12, 13];
- 4) генерация электромагнитного излучения субтерагерцового диапазона в турбулентной плазме, нагреваемой электронным пучком [14, 15].

Параллельно с программой исследований, в которых использовался сильнооточный релятивистский электронный пучок, в последнее время на установке проводились также эксперименты при более низких параметрах плазмы с субрелятивистским электронным пучком, имеющим энергию 80–100 кэВ, мощность 2–8 МВт и длительность масштаба 100 мкс [16, 17]. Основной задачей этих экспериментов было изучение процессов в квазистационарных условиях, недостижимых с релятивистским электронным пучком.

Проведение исследований по нескольким научным задачам требует подбора конкретной конфигурации эксперимента и параметров плазмы при переходе от текущей тематики исследований к следующей. При этом некоторые возможности установки могут использоваться не во всех конфигурациях. Так например, полная 12-метровая длина соленоида с многопробочным магнитным полем требуется только для экспериментов по изучению физики многопробочного удержания плазмы. Для остальных перечисленных научных тематик характерные времена основных физических процессов по порядку величины соответствуют длительности инжекции электронного пучка, поэтому для этих задач длина магнитной системы может быть уменьшена.

Анализ возможностей развития установки ГОЛ-3 привел к решению о проведении ее глубокой реконструкции. Целью реконструкции является оптимизация конфигурации оборудования для более эффективного решения научных задач и сокращения времени, затрачиваемого на переход от одной конфигурации эксперимента к другой. Планируется создание двух новых специализированных установок на месте существующей многопробочной ловушки ГОЛ-3. Первым этапом реконструкции является создание установки для проведения исследований в области физики пучково-плазменного взаимодействия и генерации электромагнитного излучения терагерцового диапазона. Эта установка получила название ГОЛ-3Т, она является прямым продолжением линии ГОЛ-3. Вторая установка ГОЛ-НВ предназначена для изучения многопробочного удержания плазмы, нагреваемой при помощи инжекции

нейтральных пучков. Эта установка будет создана на последующих этапах реконструкции, ее научная программа обсуждается в [18].

В данной статье приведено описание установки ГОЛ-3Т и основных плазменных диагностик, включая необходимые ссылки на статьи с более подробным описанием отдельных подсистем и измерительных методик.

2. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ УСТАНОВКИ

Важной задачей научной программы установки ГОЛ-3Т является достижение эффективной генерации плазмой электромагнитного излучения терагерцового диапазона, возникающего в ходе эволюции электронных плазменных колебаний, накачиваемых при релаксации релятивистского электронного пучка. В случае инжекции пучка в замагниченную плазму характерным масштабом частоты такого излучения служит частота верхнегибридной ветви электронных колебаний. Для достижения частоты излучения в 1 ТГц и выше необходима плотность плазмы более 10^{21} м^{-3} .

Отметим, что существуют и другие схемы плазменных терагерцовых источников, основанные на генерации гармоник циклотронного излучения. Принципиальное отличие исследуемого нами механизма генерации состоит в том, что продвижение в область более высоких частот электромагнитного излучения достигается не увеличением индукции магнитного поля, а наращиванием плотности плазмы.

В исследуемом нами механизме генерации электромагнитного излучения его мощность сильно зависит от уровня накачки электронных плазменных колебаний в ходе коллективной релаксации электронного пучка. Условия для эффективной релаксации релятивистского электронного пучка в плазме с плотностью масштаба 10^{21} м^{-3} были найдены ранее в экспериментах на установке ИНАР при длительности электронного пучка около 50 нс [19] и в последующих экспериментах на установке ГОЛ-3 для пучков микросекундного диапазона длительности (см. [2, 5] и последующие работы). Отметим, что длительность инжекции электронного пучка в плазму и площадь поперечного сечения области пучково-плазменного взаимодействия являются существенными параметрами эксперимента, поскольку процесс генерации не является непрерывным. Излучение генерируется в виде коротких всплесков, при этом в зависимости от параметров эксперимента длительность таких всплесков может варьироваться от единиц наносекунд до единиц микросекунд [20, 21]. При большой интенсивности генерации отдельные всплески начинают сливаться. Наиболее вероятным объяснением подобной динамики процесса является появление

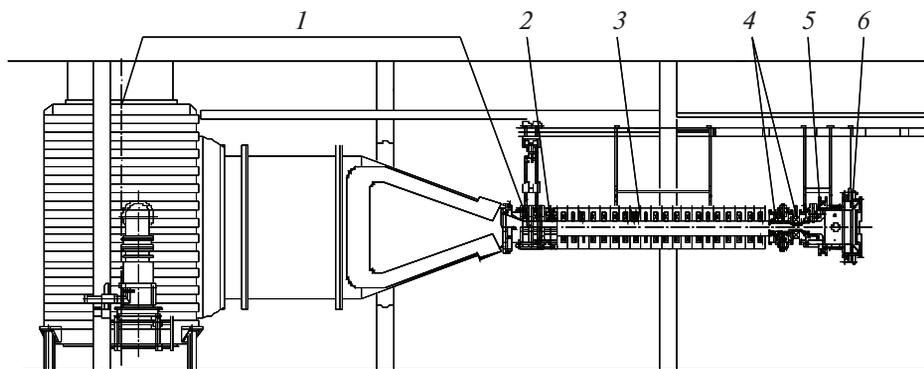


Рис. 1. Схема установки ГОЛ-3Т (показано только оборудование, расположенное на основном уровне экспериментального зала): 1 – элементы конструкции ускорителя У-2, 2 – входная магнитная пробка, 3 – соленоид, 4 – выходные магнитные пробки, 5 – система создания предварительной плазмы, 6 – коллектор для приема пучка на выходе из плазмы.

отдельных компактных генерирующих областей плазмы, количество которых в поле зрения детектора изменяется в зависимости от условий эксперимента.

К настоящему времени на установке ГОЛ-3 уже проведены несколько серий экспериментов по генерации субтерагерцового излучения в турбулентной плазме, нагреваемой электронным пучком (см., например, [13, 14]). Задача получения генерации на более высоких частотах складывается из двух отдельных частей. Во-первых, необходимо обеспечить создание плазменного столба с заданной начальной плотностью. Во-вторых, при увеличении плотности плазмы требуется и соответствующее увеличение плотности тока инжектируемого в нее электронного пучка при сохранении достаточно малой угловой расходимости электронов. В данной работе описывается результат первого этапа реконструкции установки, в ходе которого была создана новая магнитоплазменная система ГОЛ-3Т. Реконструкция ускорителя У-2 запланирована на последующий этап работы.

При выборе технических характеристик новой плазменной части установки ГОЛ-3Т учитывался опыт работы с электронными пучками большого энергосодержания. Инжектируемый в плазму электронный пучок имеет запас энергии, достаточный для того, чтобы произвести необратимые разрушения вакуумной камеры в случае потери устойчивости при его транспортировке вдоль замagnetического плазменного столба. Устойчивость транспортировки пучка зависит в значительной степени от параметров предварительной плазмы. Важную роль в обеспечении устойчивости играет самоорганизация токов в плазме, которая в оптимальных условиях приводит к образованию стабильной магнитной конфигурации с широким магнитным полем [22]. Недостаточно высокая проводимость плазмы вне сечения электронного пучка

препятствует формированию обратного тока в этой области, что приводит к росту нескомпенсированного полного тока по плазменному столбу [7, 22, 23] и к связанной с этим возможности нарушения критерия устойчивости Крускала–Шафранова

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

где q – запас устойчивости, B_z и B_θ – продольная и азимутальная компоненты магнитного поля, a и L – радиус и длина токнесущей плазмы, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, I – полный ток по плазме. Реальная конфигурация эксперимента (проводимость стенок камеры, вмороженность магнитного поля в торцы и т.п.) несколько изменяет численное значение порога неустойчивости относительно предсказываемого формулой (1). Для типичных параметров эксперимента ГОЛ-3 (длина плазмы 12 м, магнитное поле 4.5 Тл, ток электронного пучка до 30 кА) нарушение условий для формирования компенсирующего обратного тока может привести к тому, что пороговый ток относительно критерия (1) будет превышен в несколько раз и система пучок-плазма потеряет глобальную устойчивость.

Риск потери устойчивости существует при любых параметрах эксперимента, например, вследствие ошибок работы оборудования. Однако он существенно повышается при увеличении плотности плазмы. Поэтому было принято решение сократить длину магнитной системы установки ГОЛ-3 в несколько раз для того, чтобы даже при самых неблагоприятных условиях (например, при отказе системы создания предварительной плазмы или при ошибках синхронизации срабатывания отдельных подсистем установки) критерий Крускала–Шафранова не нарушался и

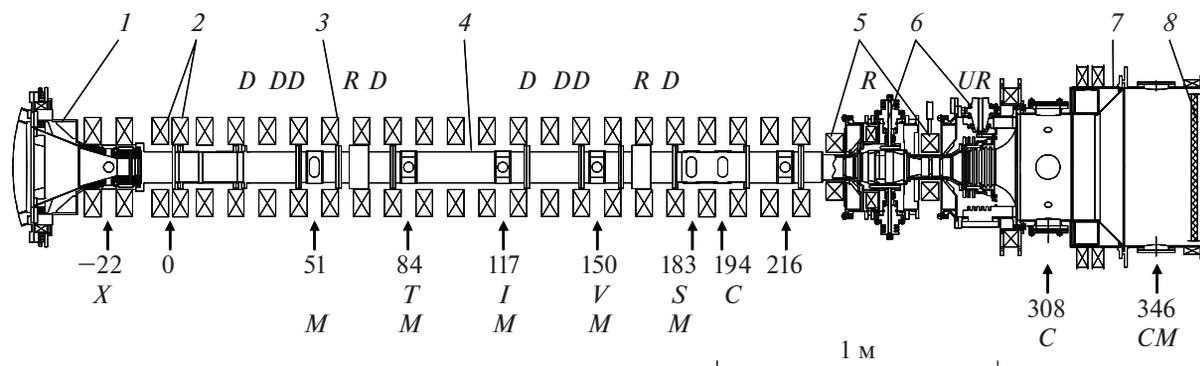


Рис. 2. Схема вакуумной камеры и мест расположения основных диагностик. Цифрами обозначены: 1 – камера сжатия электронного пучка ускорителя У-2, 2 – катушки входной магнитной пробки, 3 – катушки соленоида, 4 – вакуумная камера, 5 – катушки выходных магнитных пробок, 6 – высоковольтные электроды системы создания предварительной плазмы, 7 – бак выходного расширителя магнитного потока, 8 – коллектор для приема пучка на выходе из плазмы. Цифры под стрелками обозначают координаты диагностических окон по продольной оси z , за точку начала отсчета $z = 0$ принят центр входной магнитной пробки. Буквенные обозначения соответствуют местам расположения диагностик: X – датчики жесткого тормозного излучения, D – диамагнитные петли, M – регистрация субтерагерцового излучения, R – пояса Роговского, T – томсоновское рассеяние, I – интерферометр 10.6 мкм, V – ВУФ детектор, S – спектроскопия высокого разрешения, C – быстрые цифровые камеры, U – датчик напряжения на электроде источника предварительной плазмы.

транспортировка электронного пучка по плазме оставалась макроскопически устойчивой.

3. УСТРОЙСТВО ПЛАЗМЕННОЙ ЧАСТИ

При создании плазменной части установки ГОЛ-3Т были использованы ранее существовавшие элементы установки ГОЛ-3: катушки магнитной системы, секции вакуумной камеры, системы питания, вспомогательные системы. Компонировка установки ГОЛ-3Т приведена на рис. 1 (показано оборудование, расположенное на основном уровне экспериментального зала). Полная магнитная система установки включает в себя основной соленоид, катушки сильного поля, катушки системы создания предварительной плазмы и выходного расширителя магнитного потока, а также магнитную систему ускорителя У-2. Основным соленоидом является единственной модифицированной частью, остальные элементы магнитной системы использованы от установки ГОЛ-3 без изменений. Соленоид состоит из 20 стандартных катушек, расположенных с шагом 11 см [24]. Катушки соленоида запитываются током от части секционированной конденсаторной батареи ГОЛ-3 [25]. Система питания позволяет работу в режиме с однородным магнитным полем с индукцией 4.5 Тл, а также в режимах с продольной модуляцией (гофрировкой) магнитного поля с периодами 22 и 44 см при такой же величине индукции в максимумах гофрировки. Рабочий ток в каждой катушке имеет величину до 6 кА в конфигурации однородного магнитного поля и до 10.5 кА в конфигурациях с гофрированным полем. В описанных в данной статье первых

экспериментах на установке ГОЛ-3Т использовалась конфигурация с однородным магнитным полем.

Вакуумная камера изготовлена из нержавеющей стали и имеет секционированную конструкцию (см. рис. 2), что позволяет проводить простую адаптацию установки к требованиям конкретного эксперимента. Внутренний диаметр камеры равен 10 см. Откачка ведется через торцы камеры. Внутри камеры расположены стеклокерамические лимитеры с апертурой 8 см, которые уменьшают концентрацию пристеночной плазмы, и один графитовый лимитер с апертурой 6 см, который защищает систему создания предварительной плазмы в случае неустойчивой транспортировки пучка со значительным смещением по радиусу. Рабочая плотность плазмы является достаточно высокой, поэтому такая простая конструкция камеры в наших условиях не приводит к существенному увеличению концентрации примесей в плазме. По данным детального анализа примесей, величина эффективного заряда ионов $Z_{eff} = 1.8$ [26]. Приведенная величина близка к значению $Z_{eff} = 1.6$, полученному ранее в [5] при подгонке единственного свободного параметра численного кода к динамике энергосодержания плазмы на стадии остывания.

Стартовая низкотемпературная плазма создается при помощи специального сильноточного разряда, протекающего вдоль магнитного поля на всю длину установки. Предварительно в вакуумную камеру осуществляется импульсный напуск водорода с заданным распределением концентрации по длине. Разряд формируется системой со-

здания предварительной плазмы, расположенной после первой выходной катушки сильного поля, расположенной на $z = 233$ см. Здесь и далее продольная координата z отсчитывается от центра входной магнитной пробки. Вторая выходная магнитная пробка расположена на $z = 266$ см. Электродная система состоит из трех кольцевых высоковольтных электродов и двух групп из нескольких плавающих диафрагм, расположенных в области каждой выходной магнитной пробки. Один из высоковольтных электродов является основным, а два других обеспечивают хорошую управляемость срабатывания разряда в широком диапазоне рабочих давлений. На противоположном конце соленоида ток разряда замыкается на стенку вакуумной камеры поперек магнитного поля в области финальной компрессии электронного пучка перед его инжекцией в соленоид. Проводимость там обеспечивается коротким облаком специально напускаемого криптона. Подробно устройство и принцип работы системы создания предварительной плазмы описаны в [27]. Как и ожидалось, конфигурация с укороченной длиной плазменного столба, принятая для ГОЛ-3Т, является более благоприятной для работы разряда, поскольку в несколько раз уменьшилась индуктивность и активное сопротивление плазмы в соленоидальной части установки. Это улучшило соотношение между полным током в цепи питания разряда и током, протекающим через всю длину установки. Благодаря этому обстоятельству удалось расширить диапазон рабочих параметров установки в сторону более высокой концентрации плазмы.

После системы создания предварительной плазмы расположен выходной расширитель с уменьшающимся магнитным полем. Приемник прошедшего электронного пучка расположен на $z = 357$ см в магнитном поле масштаба 0.1 Тл, в котором удельная тепловая нагрузка на поверхность приемника не приводит к существенной эрозии графитовой поверхности приемника. Приемник пучка смонтирован на изоляторе и соединен с корпусом установки при помощи проводочных спиральных резисторов. Поэтому приемник может приобретать ненулевой потенциал при протекании тока через него, что способствует формированию обратного плазменного тока и стабилизирующей спиральной конфигурации магнитного поля с сильным широм при инжекции релятивистского пучка.

4. ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

В данном разделе статьи описано состояние диагностического комплекса на момент завершения физического запуска установки. Некоторые важные системы в настоящее время находятся на стадии монтажа или наладки. Расположение ос-

новных плазменных диагностик показано на рис. 2. При рассмотрении состава диагностического комплекса установки следует учитывать некоторые особенности плазмы ГОЛ-3Т, связанные с физикой пучково-плазменного взаимодействия. Основные параметры плазмы не только изменяются во времени во время инжекции релятивистского электронного пучка, но и существенно зависят от пространственных координат, и в частности, от расстояния от входной магнитной пробки, через которую производится инжекция пучка в плазму. Поэтому некоторые диагностические комплексы имеют несколько детекторов, распределенных по длине вакуумной камеры. Сравнение данных различных диагностик нужно проводить с должным пониманием зависимости параметров плазмы от продольной координаты и времени. Функция распределения электронов является сильно неравновесной с большой долей надтепловых электронов, спектр которых доходит вплоть до энергии электронного пучка (см., например, [28]). Наличие популяции надтепловых электронов с большой длиной свободного пробега в плазме приводит к тому, что происходит транспорт энергии и частиц из областей максимально интенсивной релаксации электронного пучка вдоль магнитного поля [29]. Поэтому продольные распределения удельного энергосодержания плазмы, электронной температуры и других параметров нагретой плазмы не совпадают с распределением интенсивности пучково-плазменного взаимодействия вдоль оси плазменного столба. Эти обстоятельства необходимо учитывать при интерпретации результатов измерений.

Электротехнические и внутрикамерные диагностические были перенесены с установки ГОЛ-3 без изменений. В экспериментах измеряются напряжение на высоковольтном электроде и ток разряда источника предварительной плазмы ($z = 289$ см), полный ток на $z = 68, 176$ и 246 см. Охватывающие четырехвитковые диамагнитные петли располагаются на $z = 27, 43, 44, 77, 126, 142, 143$ и 176 см. Остальные диагностические присоединены к окнам вакуумной камеры. Тefлоновые радиопрозрачные окна для вывода микроволнового излучения из вакуумной камеры смонтированы на $z = 51, 84, 117, 150, 183$ и 346 см. На установке смонтированы три ПЗС-камеры, регистрирующие свечение плазмы. Камеры расположены на $z = 194, 308$ и 346 см. Камеры, расположенные на двух последних координатах, служат для наблюдения за плазмой в промежутке между второй выходной магнитной пробкой и приемником пучка. На $z = 117$ см в одном сечении с микроволновой диагностикой находится интерферометр Майкельсона с рабочей длиной волны 10.6 мкм, конструкция которого подробно описана в [30]. Излучение плазмы в вакуумном ультрафиолетовом диапазоне на $z = 150$ см регистрируется ваку-

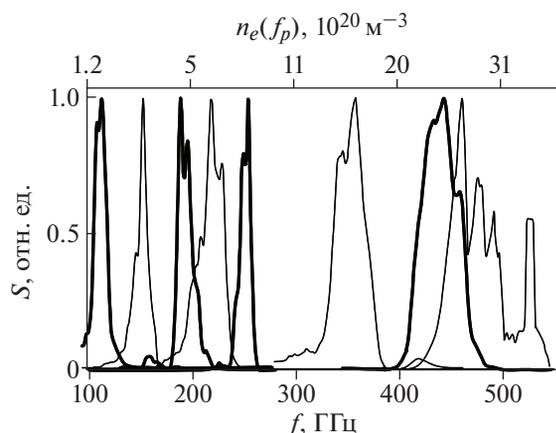


Рис. 3. Спектральная чувствительность каналов полихроматора со стартовым комплектом частотно-селективных фильтров. Максимум на кривой спектральной чувствительности каждого канала принят за единицу для наглядности. Верхняя шкала показывает плотность плазмы с соответствующей плазменной частотой.

умным фотодиодом с алюминиевым фотокатодом. Контроль правильности процесса транспортировки и сжатия электронного пучка перед его инжекцией в плазменную систему осуществляется при помощи системы из восьми полупроводниковых детекторов тормозного излучения, возникающего при попадании электронов гало релятивистского пучка на входную обрезаящую диафрагму. Эти детекторы размещены на поверхности вакуумной камеры на $z = -40$ см.

Часть окон вакуумной камеры используется для технологических целей. Система импульсного газонапуска использует окна на $z = -22$ см (напуск криптона), 51 и 150 см (напуск водорода). Все четыре окна в сечении камеры на $z = 216$ см заняты графитовым лимитером, который защищает электроды системы создания предварительной плазмы от разрушения электронным пучком в случае, если система пучок—плазма теряет макроскопическую устойчивость.

Установка оснащена развитой диагностикой параметров электромагнитного излучения субтерагерцового диапазона, которое может возникать в плазме в результате нелинейных процессов с участием плазменных электронных колебаний. Особенность проводимых на нами экспериментов состоит в том, что в некоторых режимах работы установки электронная циклотронная частота соизмерима с плазменной частотой. При этом плотность плазмы, ее температура, а также локальные параметры пучково-плазменного взаимодействия и уровень мелкомасштабной турбулентности зависят от продольной координаты. Перечисленные обстоятельства приводят к тому, что физические процессы, которые приводят к

генерации микроволнового излучения плазмы в ходе одного импульса установки, могут существенно различаться на разных продольных координатах. Исходя из этого, диагностика субтерагерцового излучения плазмы состоит из нескольких подсистем, которые могут подсоединяться к различным тефлоновым окнам вакуумной камеры, расположение которых было указано выше.

Спектральный состав электромагнитного излучения анализируется при помощи 8-канального полихроматора, конструкция которого подробно описана в [31]. Излучение плазмы разделяется на восемь независимых пучков при помощи сеточных делителей, выполненных на основе однослойных одномерных металлических решеток с шагом много меньше характерных рабочих длин волн. На пути каждого пучка излучения располагается квазиоптический фильтр, созданный на основе частотно-избирательных поверхностей, который вырезает заданный диапазон частот для соответствующего канала полихроматора. Полоса пропускания фильтров $\Delta f/f \approx 15\%$. После фильтров излучение фокусируется на входные окна детекторов, в качестве которых используются диоды Шоттки, имеющие временное разрешение не хуже, чем 2 нс.

Данная диагностика позволяет проводить одновременные измерения в диапазоне частот от 90 до 500 ГГц. Спектральная чувствительность 8-канального полихроматора с конкретным набором фильтров, подготовленных для стартовых экспериментов на ГОЛ-3Т, приведена на рис. 3. На вход полихроматора может устанавливаться дополнительный сеточный поляризатор для выделения заданной поляризации излучения при измерении спектра. Абсолютная калибровка частотно-селективных характеристик каналов этой диагностики периодически производится на стенде ТГц-измерений в Аналитико-технологическом инновационном центре “Высокие технологии и новые материалы” Новосибирского государственного университета.

Вторым измерительным прибором микроволновой диагностики является двухканальный поляриметр. Поляриметр состоит из двух близких по характеристикам детекторных секций, аналогичных используемым в полихроматоре, и квазиоптического сеточного поляризатора. Такой прибор позволяет осуществлять одновременное прямое измерение интенсивности двух взаимноортогональных компонент излучения. Диапазон спектральной чувствительности определяется полосовым фильтром, который устанавливается перед поляриметром (см. рис. 4). Данная методика определения поляризации излучения ранее использовалась в экспериментах [15].

Описанные выше системы входят в стартовый набор диагностик, они были подготовлены к ра-

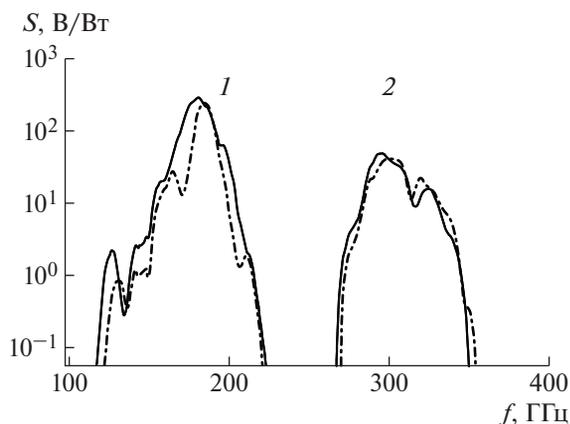


Рис. 4. Спектральная чувствительность каналов поляриметра при использовании двух различных спектрально-селективных фильтров (кривые с обозначениями 1 и 2). Сплошные линии относятся к каналу, регистрирующему поперечную компоненту электрического поля, пунктир – к каналу, регистрирующему продольную компоненту.

боте к моменту физического запуска установки. Помимо этого, планируется запуск нескольких дополнительных диагностик после начала экспериментов по инжекции релятивистского электронного пучка в плазму. Радиальный профиль плотности плазмы будет измеряться на $z = 84$ см при помощи модифицированной двухимпульсной системы томсоновского рассеяния, ранее располагавшейся в другом сечении вакуумной камеры (см. [32]). Спектральная система высокого разрешения [33], состоящая из двойного монохроматора ДФС-24 и 16-канального блока фотомножителей ФЭУ-84, будет размещена на $z = 183$ см. Задачей этой диагностики будет измерение величины турбулентных электрических полей в плазме во время инжекции релятивистского электронного пучка по штарковскому уширению формы спектральных линий. Будут расширены возможности диагностики терагерцового излучения. В частности, диапазон регистрируемых частот будет увеличен до 3 ТГц, и будет увеличено количество точек наблюдения по длине плазменного столба. Планируется также установка компактных катушек для измерения азимутальной компоненты магнитного поля (зондов Мирнова) в свободные от других диагностик окна вакуумной камеры.

Электрические сигналы всех диагностик оцифровываются аппаратурой измерительного комплекса, архитектура которого описана в [34]. Аппаратура измерительного комплекса осуществляет также подачу запускающих сигналов на все основные подсистемы установки. В настоящее время основная часть сигналов измеряется при помощи синхронных аналого-цифровых преобразователей А1220 (50 МГц, 12 бит, 32К от-

четов на канал, [35]). Для диагностик, требующих регистрации сигналов с более высоким временным разрешением, к которым относятся система томсоновского рассеяния и диагностики микроволн, используются аналого-цифровые преобразователи А12500 (500 МГц, 12 бит, 3М отсчетов на канал, [36]). Запись всех сигналов ведется в единую базу данных, резервная копия которой автоматически сохраняется на выделенном удаленном сервере после каждого рабочего цикла.

5. ФИЗИЧЕСКИЙ ПУСК УСТАНОВКИ ГОЛ-3Т

После завершения работ по монтажу плазменной части установки ГОЛ-3Т был проведен ее физический пуск, в ходе которого была продемонстрирована работоспособность установки и доказана возможность получения низкотемпературной стартовой плазмы в заданном интервале плотностей. Эксперименты проводились в двух основных конфигурациях. На первом этапе магнитная система ГОЛ-3Т работала независимо от магнитной системы ускорителя У-2. При этом торец вакуумной камеры, противоположный от системы создания предварительной плазмы, был закрыт фланцем из нержавеющей стали, электрически соединенным с корпусом. В этой конфигурации ток разряда замыкался через торцевой фланец и далее по вакуумной камере возвращался в систему питания разряда. На втором этапе работ торцевой фланец был демонтирован, соленоид и вакуумная камера были присоединены к ускорителю У-2 и установка была испытана в полной проектной конфигурации. В этом случае ток разряда замыкался на корпус установки за счет поперечной столкновительной проводимости, которую обеспечивал стужок криптона, импульсно напускавшийся на $z = -22$ см перед входной магнитной пробкой. В описываемых экспериментах напуск водорода в камеру производился при помощи одного импульсного клапана на $z = 150$ см. В дальнейшем планируется использовать дополнительно второй импульсный клапан на $z = 51$ см для более точного формирования начального профиля концентрации водорода по длине установки с целью создания оптимальных условий для генерации субтерагерцового излучения.

На рис. 5 показана типичная динамика параметров разряда в конфигурации с замыканием разряда на металлическую поверхность на дальнем торце вакуумной камеры при работе в режиме большой плотности (среднее $n_e \approx 5 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$). Токи по плазменному столбу J_{pl} , измеренные поясами Роговского на $z = 68$ и 176 см, совпадают с точностью калибровки датчиков. Плазменный ток совершает несколько периодов колебаний с затухающей амплитудой, плотность плазмы на-

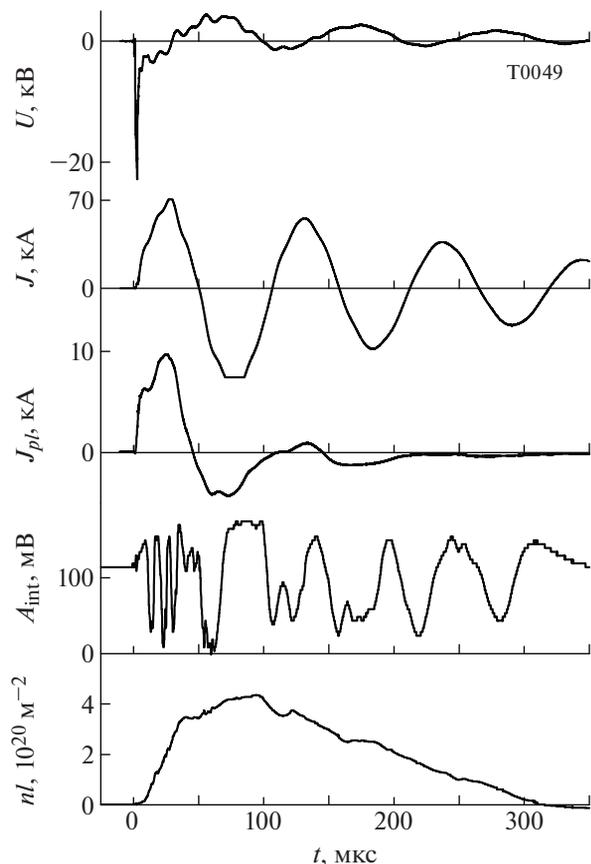


Рис. 5. Типичная динамика параметров разряда. Режим большой плотности в конфигурации с замыканием разрядного тока на проводящий фланец, смонтированный на противоположном торце вакуумной камеры. Сверху вниз показаны сигналы: напряжение на высоковольтном электроде прямого разряда U , полный ток в цепи питания системы создания предварительной плазмы J , ток по плазменному столбу J_{pl} , сигнал интерферометра A_{int} , интеграл плотности по диаметру плазмы nl , вычисленный по сигналу интерферометра. Здесь и далее за начало отсчета времени $t = 0$ принят момент подачи высокого напряжения.

растает в течение двух первых полупериодов тока. Амплитуда тока J_{pl} достигает величины в 20–25 кА при низкой плотности плазмы и уменьшается при увеличении начальной концентрации водорода. Полный ток разряда доходит до 75 кА, часть этого тока замыкается внутри источника предварительной плазмы и на защитную диафрагму на $z = 216$ см, а через время, соответствующее времени пролета ионов от высоковольтного электрода до выходного приемника пучка, существенная часть тока начинает протекать и в данном направлении. При уменьшении амплитуды колебаний плазменного тока J_{pl} плотность плазмы постепенно уменьшается и плазма внутри вакуумной камеры распадается несмотря на то,

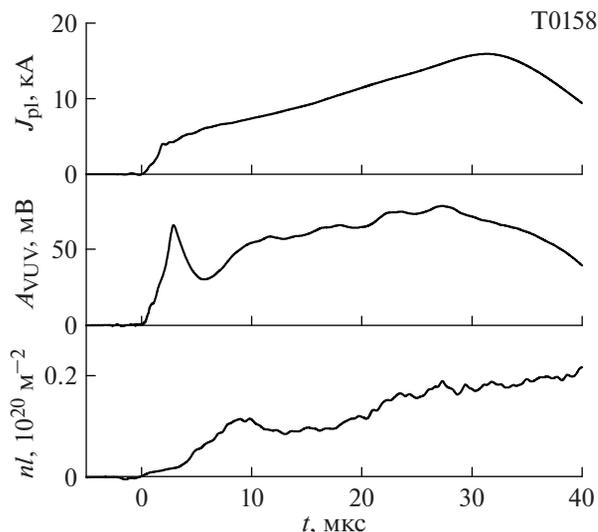


Рис. 6. Динамика параметров разряда на первой полу- волне тока по плазменному столбу. Режим низкой плотности в конфигурации с замыканием разрядного тока на стенку вакуумной камеры через облако криптона, напущенное на $z = -22$ см. Сверху вниз показаны сигналы: ток по плазменному столбу J_{pl} , сигнал детектора вакуумного ультрафиолетового излучения A_{UV} , интеграл плотности по диаметру плазмы nl , вычисленный по сигналу интерферометра.

что полный ток в системе создания предварительной плазмы продолжает протекать.

Пример – типичная динамика параметров разряда при низкой плотности в полной магнитной конфигурации (с замыканием плазменного тока J_{pl} поперек магнитного поля через сгусток криптона) – приведен на рис. 6. В данном случае показан только первый полупериод разрядного тока, а уже второй полупериод имеет незначительную величину. Это обстоятельство не является существенным для экспериментов по пучково-плазменному взаимодействию, поскольку обычно инжекция электронного пучка начинается незадолго до первого максимума плазменного тока. Как видно из рис. 5 и 6, на фазе роста тока увеличивается и плотность плазмы. Это позволяет изменять начальную плотность плазмы при варьировании момента начала инжекции электронного пучка относительно начала разрядного тока.

На рис. 7 представлен радиальный профиль свечения плазмы в красном участке видимого спектра на $z = 196$ см. Начало кадра цифровой камеры соответствует плановому моменту начала инжекции электронного пучка. Длительность экспозиции равна 7 мкс. Кривая спектральной чувствительности цифровой камеры SDU-285C [37] соответствует чувствительности красного канала ПЗС-матрицы Sony ICX-285AQ. Из наших предыдущих исследований спектра свечения плазмы [38] известно, что доминирующий вклад в

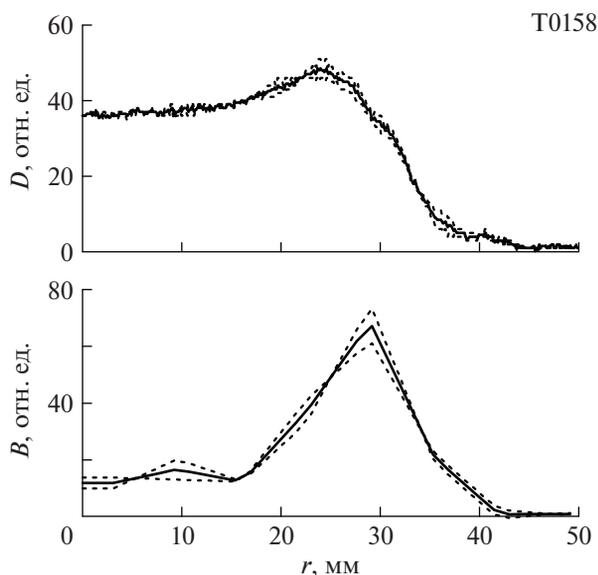


Рис. 7. Наблюдаемое радиальное распределение яркости свечения плазменного столба в красной области видимого спектрального диапазона (D) и радиальное распределение удельной яркости свечения плазмы (B), восстановленное из этих данных. Из-за некоторой асимметрии свечения плазмы верхняя и нижняя половины диаметра плазменного столба обрабатывались отдельно, эти данные показаны штриховыми линиями. Сплошными линиями показаны полусумма распределений по верхней и нижней половинам и результат ее обработки. Изображение плазменного столба регистрировалось с экспозицией в интервале времени $t = 27\text{--}34$ мкс.

излучение стартовой плазмы в этой спектральной области вносит линия водорода H_{α} . На рис. 7 представлены также результаты численного восстановления удельной яркости единицы объема плазмы. Поскольку яркость свечения плазмы имеет отклонения от аксиальной симметрии, то для оценки устойчивости процедуры восстановления производилась раздельная обработка верхней и нижней половин изображения плазменного столба. Далее полученные результаты сравнивались с результатом обработки среднего (симметризованного) профиля. Такое сравнение показало, что имеющаяся асимметрия плазменного столба является приемлемой.

Из представленного на рис. 7 результата видно, что периферия плазмы излучает более ярко, чем приосевая область. Это может быть связано с несколькими причинами: более высокой плотностью плазмы на периферии, более высокой плотностью тока разряда в этой области, приходом нейтрального водорода из залимитерных областей. Предварительно по распределению рис. 7 можно сделать вывод о том, что в основном плазма существует в пределах сечения проходного отверстия защитной диафрагмы диаметром 60 мм,

расположенной на $z = 216$ см. Уже к радиусу 40 мм (апертура стеклокерамических диафрагм, защищающих диамагнитные петли) плотность плазмы существенно уменьшается. Планируется, что в дальнейших экспериментах радиальное распределение плотности плазмы будет измеряться с более высокой точностью и локальностью после ввода в эксплуатацию системы томсоновского рассеяния.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе первого этапа реконструкции многопробочной ловушки ГОЛ-3 сооружена новая плазменная система, предназначенная для проведения исследований пучково-плазменного взаимодействия при инжекции сильнооточного релятивистского электронного пучка с длительностью микросекундного диапазона. Плазменный столб удерживается в соленоидальном магнитном поле с индукцией 4.5 Тл. Расстояние между магнитными пробками составляет 2.3 м, а вместе с системой создания предварительной плазмы полная длина плазменной части установки равна 3.7 м. Новая плазменная система получила название ГОЛ-3Т.

Проведен физический запуск установки ГОЛ-3Т, в ходе которого получена низкотемпературная стартовая плазма с плотностью в диапазоне от 2×10^{20} до $5 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$ (здесь приведены значения средней по сечению плотности, измеренной интерферометром). В целом, эксперименты этапа физического запуска плазменной части подтвердили существовавшие ранее представления [27] о механизме и особенностях работы сильнооточного разряда с кольцевыми электродами, при помощи которого на установке создается стартовая низкотемпературная плазма.

Плазменная система и стартовый набор диагностик подготовлены к началу экспериментов по инжекции релятивистского электронного пучка в плазму по программе исследования плазменных механизмов генерации мощного электромагнитного излучения терагерцового диапазона.

Реконструкция установки ГОЛ-3Т комплекса открытых ловушек ДОЛ проведена при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (идентификатор проекта RFME-FI61914X0003). Создание комплекса диагностик субтерагерцового излучения выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-12-00610).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Arzhannikov A.V., Burdakov A.V., Kapitonov V.A., Koidan V.S., Konyukhov V.V., Lebedev S.V., Mekler K.I., Nikolaev V.S., Postupaev V.V., Ryutov D.D., Shcheglov M.A., Sin-*

- itskij S.L., Voropaev S.G., Vyacheslavov L.N.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 1988. V. 30. P. 1571.
2. *Agafonov M.A., Arzhannikov A.V., Astrelin V.T., Bobylev V.B., Burdakov A.V., Chagin M.N., Deulin Yu.I., Khilchenko A.D., Khilchenko V.V., Koidan V.S., Konyukhov V.V., Kvashnin A.N., Lee O.A., Makarov A.G., Mekler K.I., Melnikov P.I., Nikolaev V.S., Perin S.S., Postupaev V.V., Razilov R.V., Rovenskikh A.F., Semenov E.P., Sinitskij S.L., Tarasov A.V., Tsigutkin K.V., Yushkina L.V., Zotkin R.P.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 1996. V. 38. № 12A. P. A93.
 3. *Arzhannikov A.V., Nikolaev V.S., Sinitsky S.L., Smirnov A.V., Yushkov M.V., Zotkin R.P.* // J. Appl. Phys. 1992. V. 72. P. 1657.
 4. *Burdakov A., Arzhannikov A., Astrelin V., Beklemishev A., Burmasov V., Derevyankin G., Ivanenko V., Ivanov I., Ivantsivsky M., Kandaurov I., Konyukhov V., Kotelnikov I., Kovenya V., Kozlinskaya T., Kuklin K., Kuznetsov A., Kuznetsov S., Lotov K., Timofeev I., Makarov A., Mekler K., Nikolaev V., Popov S., Postupaev V., Polosatkin S., Rovenskikh A., Shoshin A., Shvab I., Sinitsky S., Sulyaev Yu., Stepanov V., Trunov Yu., Vyacheslavov L., Zhukov V., Zubairov Ed.* // Fusion Sci. Technol. 2007. V. 51. № 2T. P. 106.
 5. *Бурдаков А.В., Воропаев С.Г., Койдан В.С., Лебедев С.В., Меклер К.И., Никуфоров А.А., Пиффл В., Поступаев В.В., Щеглов М.А.* // ЖЭТФ. 1996. Т. 109. С. 2078.
 6. *Астрелин В.Т., Бурдаков А.В., Поступаев В.В.* // Физика плазмы. 1998. Т. 24. С. 450.
 7. *Postupaev V.V., Arzhannikov A.V., Astrelin V.T., Averkov A.M., Beklemishev A.D., Burdakov A.V., Ivanov I.A., Koidan V.S., Mekler K.I., Polosatkin S.V., Rovenskikh A.F., Shoshin A.A., Sinitsky S.L., Zubairov Eh.R.* // Fusion Sci. Technol. 2005. V. 47. № 1T. P. 84.
 8. *Koidan V.S., Arzhannikov A.V., Astrelin V.T., Burdakov A.V., Derevyankin G.E., Ivanenko V.G., Ivanov I.A., Ivantsivsky M.V., Konyukhov V.V., Kuznetsov S.A., Makarov A.G., Mekler K.I., Nikolaev V.S., Polosatkin S.V., Postupaev V.V., Rovenskikh A.F., Shoshin A.A., Sinitsky S.L., Sulyaev Yu.S., Zubairov Eh.R.* // Fusion Sci. Technol. 2005. V. 47. № 1T. P. 35.
 9. *Аржанников А.В., Астрелин В.Т., Бурдаков А.В., Иванов И.А., Койдан В.С., Кузнецов С.А., Меклер К.И., Полосаткин С.В., Поступаев В.В., Ровенских А.Ф., Синицкий С.Л., Суляев Ю.С., Шошин А.А.* // Физика плазмы. 2005. Т. 31. С. 506.
 10. *Аржанников А.В., Батраков А.М., Бурдаков А.В., Иванов И.А., Меклер К.И., Поступаев В.В., Ровенских А.Ф., Полосаткин С.В., Сазанский В.Я., Синицкий С.Л., Суляев Ю.С.* // Физика плазмы. 2006. Т. 32. С. 113.
 11. *Burdakov A.V., Arzhannikov A.V., Astrelin V.T., Beklemishev A.D., Ivanov A.A., Kotelnikov I.A., Kruglyakov E.P., Polosatkin S.V., Postupaev V.V., Sinitsky S.L., Timofeev I.V., Zhukov V.P.* // Fusion Sci. Technol. 2011. V. 59. № 1T. P. 9.
 12. *Astrelin V.T., Burdakov A.V., Chebotaev P.Z., Filippov V.V., Koidan V.S., Mekler K.I., Melnikov P.I., Postupaev V.V., Rovenskikh A.F., Shcheglov M.A., Wuerz H.* // Nucl. Fusion. 1997. V. 37. P. 1541.
 13. *Arzhannikov A.V., Bataev V.A., Bataev I.A., Burdakov A.V., Ivanov I.A., Ivantsivsky M.V., Kuklin K.N., Mekler K.I., Rovenskikh A.F., Polosatkin S.V., Postupaev V.V., Sinitsky S.L., Shoshin A.A.* // J. Nucl. Mater. 2013. V. 438 (Supplement). P. S677.
 14. *Arzhannikov A.V., Burdakov A.V., Kuznetsov S.A., Makarov M.A., Mekler K.I., Postupaev V.V., Rovenskikh A.F., Sinitsky S.L., Sklyarov V.F.* // Fusion Sci. Technol. 2011. V.59. № 1T. P.74.
 15. *Arzhannikov A.V., Burdakov A.V., Burmasov V.S., Gavrilenko D.E., Ivanov I.A., Kasatov A.A., Kuznetsov S.A., Mekler K.I., Polosatkin S.V., Postupaev V.V., Rovenskikh A.F., Sinitsky S.L., Sklyarov V.F., Vyacheslavov L.N.* // Phys. Plasmas. 2014. V. 21. 082106.
 16. *Burdakov A.V., Avrorov A.P., Arzhannikov A.V., Astrelin V.T., Batkin V.I., Beklemishev A.D., Burmasov V.S., Bykov P.V., Derevyankin G.E., Ivanenko V.G., Ivanov I.A., Ivantsivsky M.V., Kandaurov I.V., Kasatov A.A., Kuznetsov S.A., Kurkuchekov V.V., Kuklin K.N., Mekler K.I., Polosatkin S.V., Popov S.S., Postupaev V.V., Rovenskikh A.F., Shoshin A.A., Sinitsky S.L., Sklyarov V.F., Sorokina N.V., Stepanov V.D., Sudnikov A.V., Sulyaev Yu.S., Timofeev I.V., Trunov Yu.A., Vyacheslavov L.N.* // Fusion Sci. Technol. 2013. V. 63. № 1T. P. 29.
 17. *Burdakov A.V., Arzhannikov A.V., Burmasov V.S., Ivanov I.A., Ivantsivsky M.V., Kandaurov I.V., Kuznetsov S.A., Kurkuchekov V.V., Mekler K.I., Polosatkin S.V., Popov S.S., Postupaev V.V., Rovenskikh A.F., Sklyarov V.F., Thumm M.K.A., Trunov Yu.A., Vyacheslavov L.N.* // Fusion Sci. Technol. 2013. V. 63. № 1T. P. 286.
 18. *Postupaev V.V., Burdakov A.V., Ivanov A.A.* // Fusion Sci. Technol. 2015. V. 68. № 1. P. 92
 19. *Arzhannikov A.V., Burdakov A.V., Koidan V.S., Vyacheslavov L.N.* // Phys. Scripta. 1982. V. T2B. P. 303.
 20. *Postupaev V.V., Arzhannikov A.V., Astrelin V.T., Batkin V.I., Burdakov A.V., Burmasov V.S., Ivanov I.A., Ivantsivsky M.V., Kuklin K.N., Kuznetsov S.A., Makarov M.A., Mekler K.I., Polosatkin S.V., Popov S.S., Rovenskikh A.F., Shoshin A.A., Sinitsky S.L., Sklyarov V.F., Sorokina N.V., Sudnikov A.V., Sulyaev Yu.S., Vyacheslavov L.N.* // Fusion Sci. Technol. 2011. V. 59. № 1T. P. 144.
 21. *Postupaev V.V., Burdakov A.V., Ivanov I.A., Sklyarov V.F., Arzhannikov A.V., Gavrilenko D.Ye., Kandaurov I.V., Kasatov A.A., Kurkuchekov V.V., Mekler K.I., Polosatkin S.V., Popov S.S., Rovenskikh A.F., Sudnikov A.V., Sulyaev Yu.S., Trunov Yu.A., Vyacheslavov L.N.* // Phys. Plasmas. 2013. V. 20. 092304.
 22. *Burdakov A.V., Postupaev V.V., Sudnikov A.V.* // Phys. Plasmas. 2014. V. 21. 052507.
 23. *Arzhannikov A.V., Astrelin V.T., Burdakov A.V., Koidan V.S., Mekler K.I., Melnikov P.I., Postupaev V.V., Rovenskikh A.F., Sinitsky S.L., Zabolotsky A.Yu.* // Fusion Technol. 1999. V. 35. № 1T. P. 223.
 24. *Зоткин П.П., Капитонов В.А., Койдан В.С., Конохов В.В., Макаров А.Г., Меклер К.И., Николаев В.С., Перин С.С., Фирулев К.Н.* // ВАИТ. Сер. Термоядерный синтез. 1990. Вып. 1. С. 50.
 25. *Деулин Ю.И., Лебедев С.В., Николаев В.С., Семенов Е.П.* // Приборы и техника эксперимента. 1992. № 2. С. 188.

26. Сорокина Н.В., Бурдаков А.В., Иванов И.А., Полосаткин С.В., Поступаев В.В., Ровенских А.Ф., Шошин А.А. // Физика плазмы. 2015. Т. 41. С. 573.
27. Бурдаков А.В., Койдан В.С., Меклер К.И., Полосаткин С.В., Поступаев В.В. // Физика плазмы. 2014. Т. 40. С. 223.
28. Arzhannikov A.V., Astrelin V.T., Burdakov A.V., Chebotayev P.Z., Koidan V.S., Mekler K.I., Melnikov P.I., Postupaev V.V., Rovenskikh A.F., Sinitsky S.L., Shcheglov M.A., Wuerz H. // Fusion Technol. 1999. V. 35. № 1Т. P. 146.
29. Астрелин В.Т., Бурдаков А.В., Койдан В.С., Меклер К.И., Мельников П.И., Поступаев В.В., Щеглов М.А. // ЖЭТФ. 1998. Т. 113. С. 897.
30. Бурмасов В.С., Бобылев В.Б., Иванова А.А., Иваненко С.В., Касатов А.А., Касатов Д.А., Кругляков Э.П., Кузлин К.Н., Попов С.С., Поступаев В.В., Пурьга Е.А., Ровенских А.Ф., Скляр В.Ф. // Приборы и техника эксперимента. 2012. № 2. С. 120.
31. Аржанников А.В., Бурдаков А.В., Вячеславов Л.Н., Иванов И.А., Иванцевский М.В., Касатов А.А., Кузнецов С.А., Макаров М.А., Меклер К.И., Полосаткин С.В., Поступаев В.В., Попов С.С., Синицкий С.Л., Скляр В.Ф., Тумм М.К.А. // Физика плазмы. 2012. Т. 38. С. 496.
32. Popov S.S., Burdakov A.V., Ivantsivskiy M.V., Kasatov A.A., Polosatkin S.V., Postupaev V.V., Vyacheslavov L.N. // Nucl. Instrum. Meth. A. 2013. V. 720. P. 39.
33. Акентьев Р.Ю., Бурдаков А.В., Иванов И.А., Полосаткин С.В., Поступаев В.В., Ровенских А.Ф., Шошин А.А. // Приборы и техника эксперимента. 2004. № 2. С. 98.
34. Бурдаков А.В., Квашинин А.Н., Койдан В.С., Поступаев В.В., Ровенских А.Ф., Хильченко А.Д. // Приборы и техника эксперимента. 2004. № 2. С. 38.
35. Гурко В.Ф., Зубарев П.В., Квашинин А.Н., Моисеев Д.В., Хильченко А.Д., Хильченко В.А. // Приборы и техника эксперимента. 2003. № 5. С. 32.
36. Пурьга Е.А., Хильченко А.Д., Квашинин А.Н., Зубарев П.В., Иванова А.А., Иваненко С.В. // Приборы и техника эксперимента. 2012. № 3. С. 75.
37. <http://www.sptt.ru/sptt/pdf/CSDU285.pdf>
38. Ivanov I.A., Arzhannikov A.V., Astrelin V.T., Burdakov A.V., Koidan V.S., Mekler K.I., Polosatkin S.V., Postupaev V.V., Rovenskikh A.F., Sinitsky S.L. // Fusion Sci. Technol. 2005. V. 47. № 1Т. P. 171.