

УДК 533.9

КОМПЛЕКС НЕЙТРАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ СФЕРИЧЕСКОГО ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2

© 2023 г. П. Б. Щеголев^{а,*}, В. Б. Минаев^а, А. Ю. Тельнова^а, В. И. Варфоломеев^а, В. К. Гусев^а,
Л. А. Есипов^а, Н. С. Жильцов^а, В. В. Колмогоров^с, А. А. Кондаков^с, Г. С. Курский^а,
И. В. Мирошников^а, А. А. Панасенков^б, А. В. Сорокин^с, И. А. Шиховцев^с

^аФизико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, РФ

^бНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, РФ

^сИнститут ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, РФ

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

Поступила в редакцию 15.07.2023 г.

После доработки 18.09.2023 г.

Принята к публикации 01.10.2023 г.

Комплекс инжекционного нагрева плазмы сферического токамака Глобус-М2 состоит из двух инжекторов, обеспечивающих подачу высокоэнергичных пучков атомов водорода (дейтерия) в плазму установки. Инжекторы являются автономными устройствами, позволяющими независимо друг от друга и от токамака производить подготовку к работе, вывод на рабочий режим и измерения параметров атомного пучка. Детально разбирается устройство каждого инжектора, обосновывается выбор схемы эксперимента по вводу пучков в плазму токамака, приводятся характеристики инжектируемых в плазму токамака пучков атомов обоих инжекторов, а также рассматриваются результаты экспериментов по дополнительному нагреву плазмы токамака Глобус-М2 посредством инжекции двух пучков атомов.

Ключевые слова: инжектор атомов, ионный источник, пучок высокоэнергичных атомов, ионно-оптическая система, нейтральная инжекция

DOI: 10.31857/S0367292123601261, **EDN:** CZOASL

ВВЕДЕНИЕ

Сферический токамак Глобус-М2 ($R = 0.36$ м, $a = 0.24$ м, $B_t \leq 1$ Тл, $I_p \leq 0.5$ МА; где R – большой радиус, a – малый радиус, B_t – тороидальное магнитное поле, I_p – ток по плазме) [1] является модернизированной версией установки Глобус-М ($R = 0.36$ м, $a = 0.24$ м, $B_t \leq 0.5$ Тл, $I_p \leq 0.3$ МА) [2], оснащенной одним инжектором атомов, подробное описание которого изложено в [3]. Помимо увеличения тороидального магнитного поля и тока по плазме, модернизация токамака Глобус-М предусматривала развитие систем дополнительного нагрева плазмы, которое включало в себя усовершенствования существующего инжектора атомов НИ-1 и установку второго инжектора НИ-2.

Инжекция пучков быстрых атомов в плазму токамака широко применяется как для дополнительного ее нагрева, так и для генерации токов увлечения. В результате модернизации систем дополнительного нагрева плазмы в Глобусе-М2 реализована инжекция двух нейтральных пучков водорода или дейтерия (с энергией частиц для од-

ного инжектора до 40 кэВ при мощности до 1 МВт, для второго – до 50 кэВ при мощности до 1 МВт) с суммарной выходной мощностью до 2 МВт, которая в несколько раз превышает мощность омического нагрева. Инжекция в плазму установки двух пучков атомов может позволить ей достичь более высоких значений бэта, близких к идеальному пределу (по нормализованной бэта).

Для достижения в токамаках максимальной температуры плазмы и запасенной в ней энергии гораздо эффективнее вкладывать энергию в ионы из-за аномально высокой теплопроводности электронов. Реализация предпочтительного ионного нагрева при энергиях инжекции ниже критической E_c (порядка 40 кэВ для инжекции дейтериевого пучка в водородную плазму при $\langle T_e \rangle = 1$ кэВ) [4] на мегаваттном уровне мощностей позволит существенно увеличить ионную температуру T_i по сравнению с электронной T_e [5], приблизившись таким образом к области экспериментальных параметров, характерных для термоядерного реактора. В целом наличие дополнительного канала нагрева ионов (помимо их столкновений с

Таблица 1. Технические характеристики НИ-2

Рабочий газ	водород, дейтерий
Ускоряющее напряжение, кВ	от 30 до 50
Максимальный ионный ток на водороде, А	45
Максимальная мощность атомного пучка, МВт	1
Размер эмиссионной поверхности, мм	200
Диаметр пучка на калориметре (по уровню мощности $1/e$), мм	не более 110
Максимальная длительность импульса, с	1
Пауза между импульсами максимальной длительности, мин	10
Расходимость пучка, градус	1.2
Фокусное расстояние, м	3.5 ± 0.5

электронами) позволяет изменять отношение ионной и электронной температур в широких пределах, что само по себе представляет большой интерес для исследования влияния отношения T_i/T_e на перенос тепла и частиц в ионном и электронном каналах [6]. Кроме того, инжекция в плазму двух пучков атомов, имеющих разные геометрические размеры и пространственное распределение плотности мощности, открывает дополнительные возможности для оптимизации плотности тока плазмы. Ко всему прочему модернизированный комплекс нейтральной инжекции Глобуса-М2 существенно расширит спектр исследований быстрых ионов, связанной с ними физики МГД [7], а также индуцированного им вращения плазмы [8].

УСТРОЙСТВО ИНЖЕКТОРА АТОМОВ НИ-2

Программа модернизации комплекса нейтральной инжекции токамака Глобус-М2 включала в себя установку второго инжектора атомов НИ-2 [9], технические характеристики которого представлены в табл. 1. Его конструкция базируется на разработанном в ИЯФ СО РАН инжекторе для нагрева плазмы [10].

НИ-2 представляет собой установленную на платформе вакуумную камеру, внутри которой расположены отклоняющий магнит, нейтрализатор, проходная диафрагма, приемник ионов, прицельное устройство и два крионасоса. С одной стороны к камере крепится ионный источник, с другой – подвижный поглотитель-калориметр. В состав НИ-2 также входят обеспечивающие его работу системы вакуумной откачки, электропитания, напуска рабочего газа, водяного охлаждения, управления и сбора данных. Общий вид инжектора представлен на рис. 1.

Вакуумная камера инжектора 1 (объемом порядка 2.5 м^3), выполненная из нержавеющей стали 304L, имеет прямоугольную форму с внутренними размерами $800 \times 1680 \times 1884 \text{ мм}$, толщину боковых стенок 10 мм, снаружи приварены ребра

жесткости. С одной ее стороны на торцевой стенке расположен порт диаметром 540 мм для стыковки нейтрализатора 6 и ионного источника 4, с другой – порт диаметром 690 мм для присоединения калориметра 10. Сверху вакуумный объем имеет два прямоугольных порта размерами $760 \text{ мм} \times 800 \text{ мм}$ для установки в них крионасосов 3. Внутри камеры установлена проходная диафрагма 7 диаметром 200 мм, отсекающая периферийную часть пучка и разделяющая объем на две части для обеспечения более высокого вакуума со стороны калориметра. Камера инжектора установлена на оборудованную роликами платформу 2, благодаря которой она может перемещаться по рельсам длиной 2600 мм. Для юстировки положения инжектора в горизонтальном и вертикальном направлениях на $\pm 10 \text{ мм}$ в ней предусмотрены регулируемые опоры.

Ионный источник (рис. 2) состоит из газоразрядной камеры (ГРК) 3, в которой создается плазменный эмиттер, и трехэлектродной ионно-оптической системы (ИОС) 5, обеспечивающей формирование, ускорение и фокусировку ионного пучка. Цилиндрическая часть ГРК (длина 117 мм, диаметр 296 мм) изготовлена из керамики (Al_2O_3). На охлаждаемом водой заднем фланце газоразрядной камеры, выполненном из молибдена, установлен набор постоянных магнитов, чье поле снижает поток плазмы на стенку, тем самым увеличивая энергетическую эффективность разряда. Внутренняя поверхность керамической камеры защищена от непосредственного контакта с плазмой разряда медным экраном Фарадея. Рабочий газ подается в ГРК через узел поджига 2, установленный в центре задней стенки камеры, посредством электромагнитного импульсного клапана. Разряд инициируется подачей высоковольтного импульса амплитудой до 6 кВ между корпусом клапана и изолированным от него с помощью керамической трубки задним фланцем ГРК, в котором установлен запальный электрод. Образующаяся вдоль внутренней поверхности керамической трубки короткая искра выбрасыва-

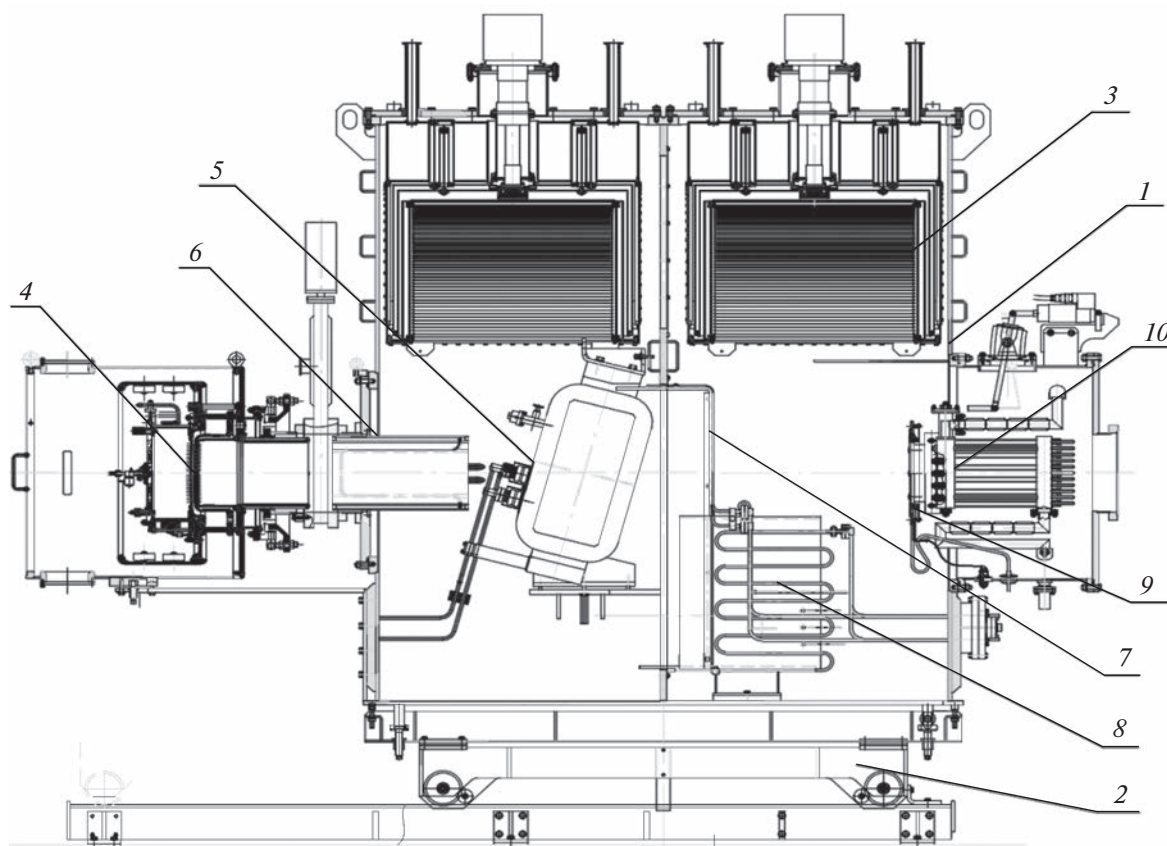


Рис. 1. Общий вид инжектора НИ-2: 1 – вакуумный объем; 2 – платформа; 3 – крионасос; 4 – ионный источник; 5 – отклоняющий магнит; 6 – нейтрализатор; 7 – диафрагма; 8 – приемник ионов; 9 – прицельное устройство; 10 – калориметр.

ется в плазменную камеру, где загорается высокочастотный разряд. Он возбуждается на частоте 4 МГц с помощью внешней трехвитковой антенны 4, изготовленной из медной трубки, причем высокочастотная мощность подается к ней через разделительный трансформатор с масляной изоляцией. При 45 кВт ВЧ-мощности, поглощенной в плазме ГРК, эмиттер способен производить до 45 А ионного тока (на водороде).

Извлечение из плазмы ГРК и ускорение положительных ионов осуществляется с помощью ИОС, которая состоит из трех вложенных друг в друга сеток (диаметр 200 мм), составленных из расположенных в гексагональном порядке отверстий, имеющих круглую апертуру. Комбинация из соосных отверстий трех сеток образует элементарную ячейку ИОС, геометрия которой со всеми размерами показана на рис. 3. Сетки ИОС выполнены в виде сферических сегментов, что обеспечивает общую фокусировку пучка на расстоянии 3.5 м от ионного источника. Ионно-оптическая система инжектора оптимизирована для получения пучка с минимальной угловой расходимостью порядка 0.9° . Электроды ИОС (первый изго-

товлен из молибдена марки ЦМ2А, остальные – из хромоциркониевой бронзы марки БрХЦр) установлены на медных кольцевых фланцах, соединенных друг с другом с помощью двух керамических изоляторов 7 высотой 80 и 10 мм соответственно. Толщина первой сетки составляет 3.5 мм, второй и третьей сеток – 6 мм для увеличения их теплоемкости, чтобы повышение температуры во время импульса пучка не приводило к увеличению его расходимости более 1.2° (проектное значение). С этой целью все фланцы, на которых установлены электроды ИОС, охлаждаются водой, что обеспечивает полный отвод тепла между выстрелами инжектора.

Ускоренные ионы в виде пучка (смесь трех основных энергетических компонентов) поступают в перезарядную камеру (нейтрализатор). Фракционный состав извлекаемого ионного пучка (H^+ , H_2^+ , H_3^+) определяется элементарными процессами, происходящими в плазме ВЧ-разряда. При прохождении быстрыми ионами через нейтрализатор в результате процесса резонансной перезарядки на избыточной газовой мишени об-

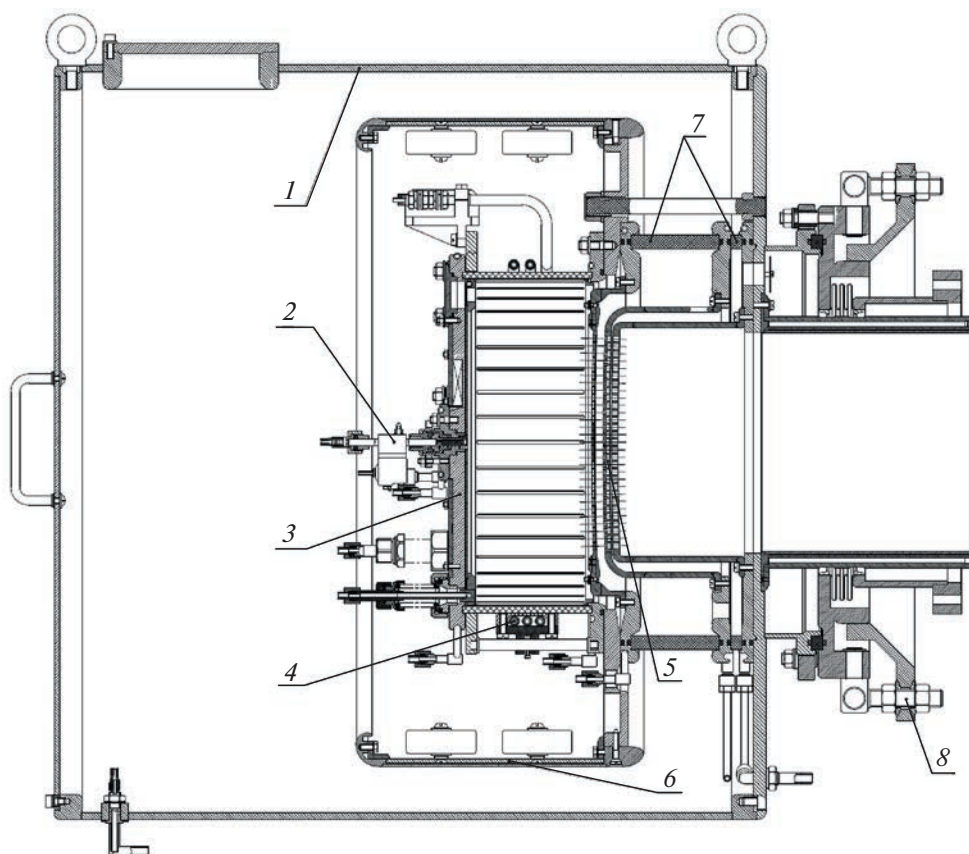


Рис. 2. Ионный источник: 1 – внешний железный экран; 2 – клапан напуска газа и устройство поджига; 3 – плазменная камера; 4 – антенна; 5 – электроды ионно-оптической системы; 6 – магнитный и электростатический экран; 7 – керамические изоляторы ИОС; 8 – юстировочное устройство.

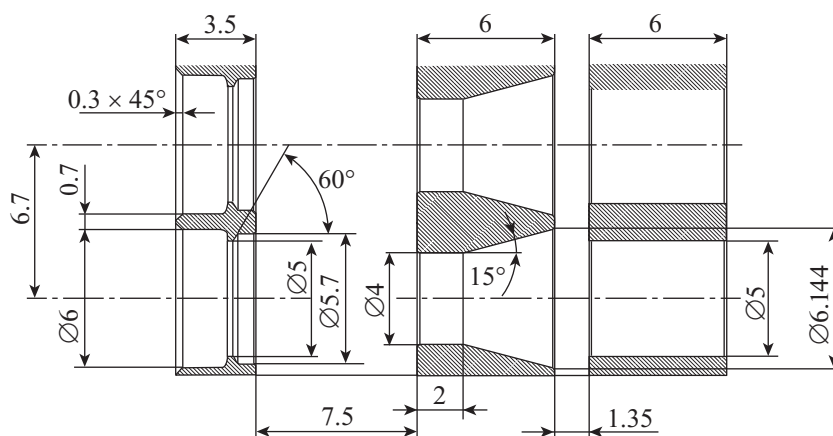


Рис. 3. Геометрия элементарной ячейки ИОС НИ-2.

разуются быстрые атомы H_1^0 трех различных энергий E , $E/2$, $E/3$ (E – основная энергия) соответственно из быстрых ионов H_1^+ , H_2^+ , H_3^+ и атомы с энергией $E/18$ ($E/10$), образующиеся из всегда существующих примесных гидроксильных ионов

H_2O^+ для водородного пучка (D_2O^+ для дейтериевого). Конструктивно нейтрализатор представляет собой медную трубку (толщина стенки 5 мм) длиной 450 мм и внутренним диаметром 197 мм, вложенную в двойной магнитный экран (труба из

магнитомягкого железа), уменьшающий уровень рассеянных магнитных полей ниже 0.3 Гс. Газ в перезарядную камеру вытекает из ГРК источника и дополнительно нагнетается с помощью импульсного электромагнитного клапана. Общая эффективная длина нейтрализатора составляет 80 см, а давление рабочего газа в нем подбирается таким образом, чтобы обеспечить равновесный выход нейтрального компонента пучка. Зависимость равновесного выхода быстрых атомов водорода на бесконечно толстой водородной мишени от энергии частиц представлена в [11], согласно ей эффективность нейтрализации водородного пучка составляет порядка 50% для компонента с основной энергией (50 кэВ), 76% — для компонента с половинной энергией и 82% — для компонента с энергией в одну треть.

На выходе из нейтрализатора с помощью отклоняющего электромагнита из пучка удаляются заряженные частицы. Магнитное поле в нем создается двумя соединенными последовательно катушками (по 26 витков каждая), находящимися в герметичном корпусе, изолированном от вакуумного объема. Они охватывают железный сердечник, между полюсами которого создается магнитное поле с напряженностью до 0.15 Тл при токе в катушках до 500 А. Величина поля электромагнита выбирается в зависимости от рода газа и энергии частиц. Зазор между полюсами составляет 220 мм, ширина полюса вдоль направления пучка — 200 мм.

Оставшиеся в пучке ионы отклоняются электромагнитом в приемник ионов, представляющий собой охлаждаемый водой объем V-образной формы, изготовленный из меди. Положение и размер приемника ионов подобраны таким образом, чтобы перехватывать все ионы с тремя разными энергиями.

Полученный в итоге атомарный пучок далее по пучковому тракту, проходя сквозь разделительную диафрагму, попадает в прицельное устройство. Оно служит для юстировки оси пучка и представляет собой медный диск с проделанными по парам в вертикальной и горизонтальной плоскостях отверстиями, за которыми расположены вторично-эмиссионные датчики. Корректировка направления оси пучка, необходимая для компенсации неточностей сборки ионного источника, в особенности его ИОС, осуществляется с помощью юстировочного устройства.

На выходе из инжектора на расстоянии около 2.5 м от ионного источника расположен подвижный поглотитель-калориметр, предназначенный для контроля параметров пучка, созданного инжектором. Поглотитель выведен на линию пучка в режиме настройки инжектора или убран с нее на время плазменного эксперимента, чтобы нейтральный пучок мог беспрепятственно попадать в

токамак. Калориметр представляет собой набор из 11 водоохлаждаемых трубок, составленных в виде двух пластин (левой и правой), на каждой из которых установлены разнесенные в пространстве термодпары, измеряющие температуру охлаждаемых водой трубок.

Вакуумный объем инжектора и камера токамака связаны между собой с помощью специально разработанного стыковочного узла, который обеспечивает гальваническую и механическую развязку между ними, а также обрезает по ширине часть пучка. Он включает проходной изолятор, сильфонный компенсатор и медную проходную диафрагму (17×22 см), охлаждаемую водой. Узел присоединен к инжектору и входному патрубку токамака с помощью фланцевых соединений.

Система высоковакуумной откачки построена на базе турбомолекулярного насоса Leybold TURBOVAC TMP 361 и форвакуумного насоса Edwards GVSP30. Система обеспечивает поддержание базового уровня давления (до 10^{-7} Торр) в камере инжектора. При работе ионного источника давление в объеме инжектора повышается за счет импульсного впрыска в него рабочего газа. Пучок, состоящий из быстрых атомов и ионов, после вылета из нейтрализатора продолжает взаимодействовать с вытекающим в камеру рабочим газом. Чтобы минимизировать потери при транспортировке пучка в токамак, необходимо обеспечить как можно более низкое давление газа на его пути. Этой цели служат большой буферный объем камеры инжектора и два крионасоса, установленных сверху на вакуумной камере инжектора. Каждый криогенный насос имеет в молекулярном режиме номинальную скорость откачки по водороду 80×10^3 л/с. На фланцах насосов расположены два патрубка для заполнения внутренних криостатов жидким азотом. Для охлаждения криопанелей в насосах используется криокулер Sumitomo RDK-415D с компрессором W71C, что обеспечивает охлаждение до температуры 3.5 К второй ступени и около 20 К первой ступени. Охлаждающей способности первой ступени недостаточно, чтобы обеспечить защиту от теплового излучения находящихся при комнатной температуре стенок камеры и внутренних элементов пучкового тракта, которые могут иметь еще более высокую температуру, поэтому применяется дополнительный радиационный экран, охлаждаемый жидким азотом. Изготовленная из меди криопанель экрана площадью 1.44 м^2 крепится ко второй ступени криокулера и расположена между медно-шеvronной перегородкой (площадью 1.13 м^2), охлаждаемой жидким азотом, и медным экраном, присоединенным к первой ступени криокулера. Общая мощность охлаждения криокулера 60 Вт, а с учетом массы его компонентов для захолаживания крионасоса в целом требуется

порядка 25 ч. Расход жидкого азота в штатном режиме составляет 3–4 л/ч. Регенерация крионасосов производится путем прогрева криостатов с жидким азотом до комнатной температуры и отключения криокулеров. Выделяющиеся из крионасосов во время регенерации газы удаляются из вакуумной камеры турбомолекулярным насосом.

Система электропитания инжектора содержит следующие устройства и блоки: источник высоковольтного питания с активными и пассивными устройствами защиты инжектора от пробоев, ВЧ-генератор с источником анодного питания, устройство питания второй сетки ионного источника, устройство питания отклоняющего электромагнита, блоки питания газовых клапанов, блок питания устройства поджига и ряд других вспомогательных источников питания. Главной особенностью системы электропитания инжектора является то, что корпус плазменной камеры вместе с ВЧ-антенной, газовым клапаном и устройством поджига во время работы инжектора находятся под напряжением источника высоковольтного питания (до 50 кВ). Напряжение изоляции этих устройств должно быть не менее 60 кВ. Мощность от ВЧ-генератора (до 60 кВт), выходной каскад которого построен на основе мощного лампового тетрода, поступает на антенну ионного источника через разделительный трансформатор. Напряжение на второй сетке формируется с помощью независимого управляемого источника отрицательного напряжения (до -1000 В). Источник высоковольтного питания инжектора состоит из понижающего многообмоточного трансформатора и 54 последовательно включенных выпрямительных модулей с ключами на основе IGBT-транзисторов, каждый из которых формирует на своем выходе напряжение 1 кВ. Выпрямительные модули питаются от вторичных обмоток трехфазного трансформатора мощностью 2 МВт, половина которых соединена в “треугольник”, а другая половина – в “звезду” для снижения уровня пульсаций. Первичные обмотки трансформатора питаются от трехфазной сети 10 кВ.

Система водяного охлаждения предназначена для отвода тепла от теплонапряженных узлов и устройств инжектора. Она построена на основе холодильной машины с замкнутым первичным контуром с дистиллированной водой. К компонентам инжектора вода подается двумя специальными насосами из бака объемом около 0.6 м³ под давлением до 6 атм.

Система напуска рабочего газа предназначена для дозированной подачи газа в ГРК ионного источника и нейтрализатор. Она включает два импульсных электромагнитных клапана с ограничивающими поток газа диафрагмами, два буферных объема (по 2 л каждый) с рабочим газом (водород, дейтерий), оснащенных манометрами и, соответ-

ственно, два баллона с запасом рабочих газов, оборудованных редукторами. Имеется система вентилей для оперативной замены рабочего газа и прокачки газовых магистралей, поскольку рабочий газ должен иметь максимально возможную степень очистки из-за непосредственного влияния на чистоту инжектируемого в токамак пучка. Во время работы инжектора импульсный клапан ГРК находится под высоким потенциалом и гальванически развязан от буферных объемов, давление рабочего газа в которых поддерживается на уровне примерно 0.2 МПа.

Система управления и сбора данных (СУСД) позволяет дистанционно управлять технологическими процессами подготовки и работой инжектора в целом. Она построена на основе промышленного компьютера со специализированной программой управления, блока гальванических развязок с модулями цифро-аналогового и аналого-цифрового преобразователей, цифровых входов/выходов и таймирования. С помощью СУСД осуществляется дистанционное управление подсистемами инжектора и их контроль, задание временной диаграммы их работы, ввод уставок напряжений или токов его систем питания, контроль состояний блокировок и автоматизированный сбор информации о функционировании систем инжектора в целом.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ИНЖЕКТОРА АТОМОВ НИ-1

В сферическом токамаке Глобус-М2 тороидальное магнитное поле и ток плазмы повышены более чем в два раза по сравнению с Глобусом-М [12], вследствие чего ожидается существенное увеличение плотности плазмы. Для эффективного ее нагрева необходимо увеличить энергию инжектируемых частиц, чтобы обеспечить оптимальную глубину проникновения пучка атомов в плазму до момента их ионизации. Программа модернизации комплекса нейтральной инжекции токамака Глобус-М включала в себя усовершенствование существующего инжектора атомов НИ-1, подробное описание узлов и систем которого представлено в [3]. На НИ-1 в зависимости от экспериментальных нужд устанавливается либо ионный источник ИПМ-1 (мощность инжекции до 1 МВт), либо ИПМ-2 (мощность инжекции до 0.5 МВт). В рамках модернизации НИ-1 разработан новый трехэлектродный ионный источник ИПМ-3, который отличается от предшественников ИПМ-1 и ИПМ-2 конструкцией высоковольтного изоляторного узла (ВИУ) и щелевой ионно-оптической системы, но сохраняет при этом преимущества плазменного эмиттера с использованием дугового разряда. Проектные характеристики нового ионного источника представлены в табл. 2.

Таблица 2. Проектные характеристики ИПМ-3

Максимальная мощность пучка ионов водорода, МВт	2.4
Максимальная длительность импульса пучка, мс	до 300
Угол расхождения пучка, градус:	
– горизонтальный (<i>вдоль щелей</i>)	не хуже ± 0.6
– вертикальный (<i>поперек щелей</i>)	не хуже ± 1.5
Максимальный ток ионного пучка на водороде, А	60
Размер газоразрядной камеры, мм	$200 \times 330 \times 130$
Размер эмиссионной поверхности, мм	120×250
Прозрачность щелевой оптики, %	не хуже 50
Ток нагрузки отрицательного электрода, А	до 7
Фокусное расстояние в вертикальной и в горизонтальной плоскостях, м	3.0–3.5
Ток накала катодов, А	1200
Напряжение накала катодов, В	10.5
Ток разряда, А	до 1300
Напряжение разряда, В	до 70
Пауза между импульсами, с	не менее 120

ИОС нового источника состоит из трех многощелевых электродов: эмиссионного (ЭЭ), отрицательного (ОЭ) и заземленного (ЗЭ). ЭЭ закрывает торец ГРК, на его щелях электрическое поле, созданное в зазоре между первой парой электродов, формирует плазменный эмиттер и извлекает поток ионов. ОЭ, находящийся под отрицательным потенциалом, обеспечивает оптимальную фокусировку отдельных ионных пучков, выходящих из щелей ЭЭ, а также служит для запираания обратного потока электронов из вторичной плазмы. Третий электрод накоротко заземлен на корпус инжектора и обеспечивает “нулевой потенциал” выходящего ионного пучка. Для крепления электродов ИОС предназначен ВИУ, который представляет собой три медных кольцеобразных фланца, соединенных между собой через цилиндрические керамические изоляторы диаметром 454 мм (высота 80 и 15 мм) с помощью текстолитовых шпилек. Решетки ЭЭ установлены непосредственно на эмиссионном фланце ВИУ. Решетки двух других электродов установлены внутри ВИУ с помощью металлических подставок, закрепленных на соответствующих фланцах. Общий вид ВИУ с закрепленной на нем ИОС источника ИПМ-3 приведен на рис. 4.

Для выбора форм, размеров щелей в электродах, а также расстояний между ними выполнено моделирование с помощью программы PBGUNS (Particle Beam GUN Simulation) [13]. Расчеты проводили для максимальных параметров водородного пучка при приложенном ускоряющем напряжении 40 кВ. Достигнутая оптимальная геометрия элементарной ячейки показана на рис. 5. Зазор между ЭЭ и ОЭ равен 6.0 мм, между ОЭ и

ЗЭ – 1.5 мм. Оптимальная эмиссионная плотность тока составила примерно 4 мА/мм².

Каждый электрод ИОС выполнен в виде 5 отдельных сеток. Для примера на рис. 6 показана одна сетка ЭЭ размером 120 мм в высоту и 50 мм в ширину. Таким образом, суммарная площадь эмиссионной поверхности составляет 120×250 мм². Рабочую область сетки ЭЭ заполняют 27 щелей (каждая размером 3×38 мм), в результате общая площадь эмиссионных отверстий составляет около 15000 мм², что соответствует прозрачности 50%. Все сетки имеют толщину 3 мм, сетки ЭЭ выполнены из молибдена марки ЦМ2А, сетки двух остальных электродов – из хромоциркониевой бронзы марки БрХЦр. Для отвода тепла от них между импульсами предусмотрены водяные каналы охлаждения. Отверстия для крепления сеток к электродам с одной из сторон сделаны овальными для компенсации тепловых расширений, возникающих во время выстрела инжектора. Рабочая поверхность сеток имеет цилиндрическую кривизну вдоль щелей, плюс к этому сетки ОЭ смещены относительно сеток ЭЭ, что обеспечивает фокусное расстояние ИОС 3.0–3.5 м. Как было отмечено выше, при ускоряющем напряжении 40 кВ оптимальная извлекаемая плотность тока в элементарном пучке на водороде составляет ~ 4 мА/мм², что дает с учетом прозрачности ИОС полный ток ионов 60 А.

ГРК нового ионного источника полностью подготовлена к работе, проведены ее испытания путем постепенного увеличения разрядного тока от 250 А до примерно 1300 А (номинальное значение), при этом вольт-амперная характеристика дугового разряда на водороде и на дейтерии представлена на рис. 7.

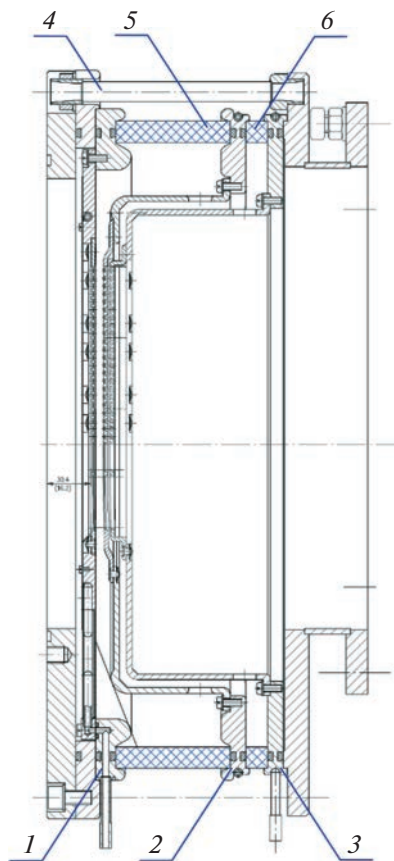


Рис. 4. ВИУ в сборе с ИОС, сечение вдоль (верхняя половина) и поперек щелей (нижняя половина): 1 – фланец ЭЭ, 2 – фланец ОЭ, 3 – фланец ЗЭ, 4 – текстолитовые стягивающие шпильки, 5 – основной керамический изолятор (50 кВ), 6 – вспомогательный керамический изолятор (5 кВ).

ВИУ в сборе с ИОС источника ИПМ-3 находится на заключительном этапе изготовления. Для его полноценной работы в схему высоко-

вольтного питания добавлен повышающий автотрансформатор, позволяющий расширить верхнюю границу диапазона получаемых напряжений до 40 кВ [9]. Внедрена новая система напуска газа в ГРК источника ионов (на основе пьезоэлектрического клапана), обеспечивающая возможность регулировать режим горения дугового разряда и параметры плазменного эмиттера ионов для получения оптимального по форме, фокусировке и мощности атомного пучка [14]. Проведена модернизация зондовой диагностики пучка атомов НИ-1, которая повысила скорость и точность обработки сигналов с вторично-эмиссионных зондов, что существенно ускорило и упростило процесс оптимизации параметров инжектируемого пучка.

Проведена реновация ионно-оптической системы источника ИПМ-2, которая с течением времени перестала соответствовать проектным параметрам. В результате реновации удалось добиться хорошей фокусировки по вертикали, однако фокусировка пучка в горизонтальной плоскости несколько ухудшилась из-за отсутствия формовки решеток ОЭ. Поперечные размеры пучка на калориметре составили 70×170 мм (на уровне 90% мощности). Тем не менее полная инжектируемая мощность дейтериевого пучка составила 500 кВт, что соответствует проектным параметрам. Таким образом, проведенная реновация ИПМ-2 позволила проводить эксперименты по нейтральной инжекции на сферическом токамаке Глобус-М2 [15].

ПОДГОТОВКА К ЭКСПЕРИМЕНТАМ И ВЫВОД НА ПРОЕКТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ИНЖЕКТОРА АТОМОВ НИ-2

На первом этапе подготовки к экспериментам инжектора НИ-2 выполнен анализ возможных вариантов геометрии инжекции и на его основе разработана схема эксперимента по вводу в раз-

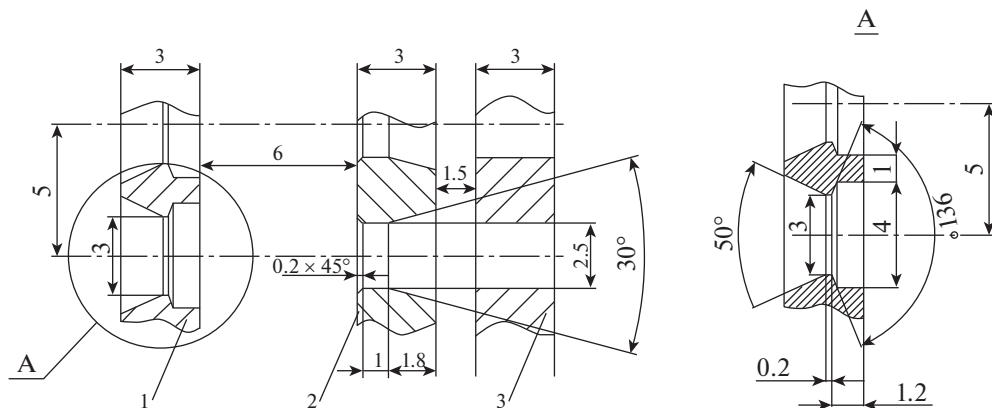


Рис. 5. Геометрия элементарной ячейки ИПМ-3: 1 – ЭЭ, 2 – ОЭ, 3 – ЗЭ.



Рис. 6. Трехмерная модель сетки ЭЭ.

ряд токамака второго пучка атомов высокой энергии, которая представлена на рис. 8. Оба атомных пучка от двух инжекторов было решено направить вдоль тока плазмы (коинжекция). Выбор оптимальной геометрии инжекции сделан на основе расчетов прямых потерь быстрых частиц для доступных значений прицельного параметра (0.27–0.32 м) нового инжектора, которые были выполнены с помощью трехмерного алгоритма, отслеживающего траектории частиц [16]. Внутренняя стенка приемных патрубков камеры токамака напротив обоих инжекторов облицована защитными графитовыми плитками. Для обоих инжекторов организована быстрая защита по длительности, благодаря которой при срыве плазменного разряда пучки практически мгновенно выключаются.

При максимально достижимом в токамаке Глобус-М2 тороидальном магнитном поле 1 Тл и токе плазмы 0.5 МА полученные прямые потери составили менее 5%, что находится в пределах вычислительной погрешности для всех доступных значений прицельного параметра, поэтому оптимизация прицельного параметра была проведена на основании расчетов при уменьшенном тороидальном магнитном поле 0.7 Тл и токе плазмы 0.3 МА для двух значений усредненной по объему плотности плазмы (5.0×10^{19} и $1.0 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$) при энергии инжекции 40 кэВ. Результаты этого анализа показаны на рис. 9, на котором представлена зависимость прямых потерь быстрых частиц от возможных значений прицельного параметра второго инжектора. На основе этих расчетов и с учетом конструктивных ограничений прицельный параметр инжектора НИ-2 был выбран 0.3 м.

На втором этапе подготовки произведена сборка и установка инжектора НИ-2 и всех его вспомогательных систем в экспериментальном зале токамака. Осуществлена их наладка и проверка, а также высоковольтные испытания источников питания и компонентов ИОС инжектора, вакуумные и гидравлические испытания его узлов [17]. Для обеспечения тангенциальной инжекции пучка атомов инжектора НИ-2 в камеру токамака его круглый порт диаметром 0.4 м был оборудован косым патрубком с углом наклона, обеспечивающим полное прохождение пучка с

выбранным прицельным параметром 0.3 м. Затем инжектор был подсоединен к камере токамака через вакуумный затвор с помощью стыковочного узла, обеспечивающего гальваническую и механическую развязки, а также обрезающего по ширине часть пучка (потери мощности менее 6%), чтобы он не касался стенок входного патрубка токамака.

На заключительном этапе проведены пусконаладочные работы, в ходе которых инжектор НИ-2 выведен на проектные параметры. Получен пучок атомов дейтерия с энергией частиц 50 кэВ мощностью $1.00 \pm 0.05 \text{ МВт}$, измерены его электротехнические характеристики (см. рис. 10), геометрические размеры и энергетический спектр.

Для измерения размеров пучка и пространственного распределения его мощности по сечению, как было описано выше, используется калориметр. Он представляет собой набор водоохлаждаемых трубок, составленных в виде двух пластин (левой и правой), на каждой из которых установлен набор из 6 разнесенных в пространстве термопар, измеряющих температуру охлаждаемых водой труб. На каждой пластине термопары расположены симметрично по 5 штук в вертикальной плоскости (одна центральная и по 2 термопары вверх и вниз на расстоянии 40 мм друг от друга каждая) и еще по одной в горизон-

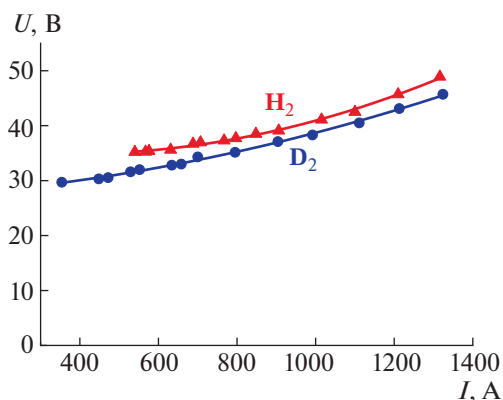


Рис. 7. Вольт-амперная характеристика дугового разряда в ГРК источника ИПМ-3.

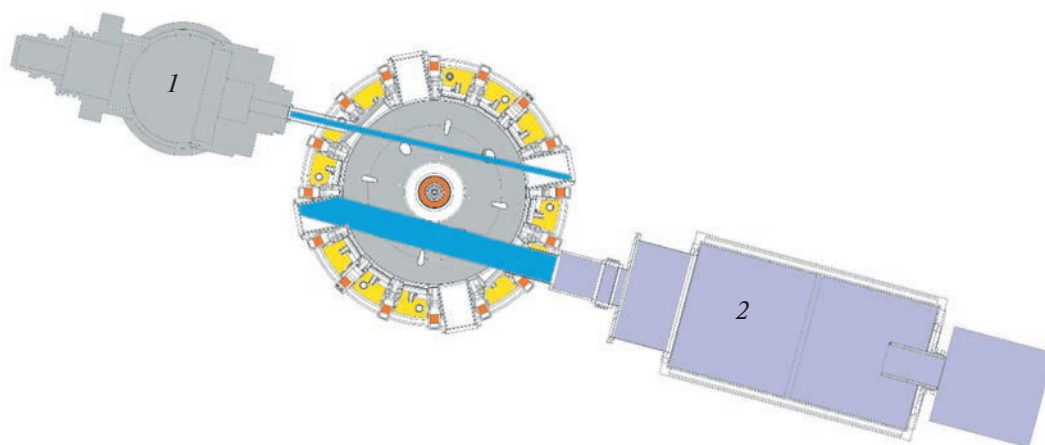


Рис. 8. Схема эксперимента по дополнительному нагреву плазмы токамака с помощью инжекторов 1 – НИ-1 и 2 – НИ-2.

тальной плоскости (на расстоянии 40 мм от центральной). Величина потока воды, проходящего через пластины калориметра, известна, поэтому, интегрируя подъем сигнала с термопар во время импульса пучка, получаем значение отводимой водой тепловой энергии. Оно пропорционально плотности мощности пучка, локально попадающей на трубку калориметра, за которой расположена термопара. Для примера, на рис. 11 изображен типичный вид получаемых температурных зависимостей во времени со всех термопар левой створки калориметра, а также рассчитанный на основе этих данных профиль мощности атомного пучка длительностью 100 мс и электрической мощностью 1.35 МВт (энергия частиц пучка

50 кэВ, ток пучка 27 А), осциллограммы сигналов которого изображены на рис. 10.

Для ускоряющего напряжения 50 кВ после предварительного подбора напряжения, подаваемого на вторую сетку (–790 В), проведено сканирование по току пучка (от 23 до 30 А), результаты экспериментов показаны на рис. 12, на котором изображена получившаяся зависимость диаметра пучка на уровне мощности $1/e$ от его тока. Таким образом подобран оптимальный ток пучка (от 25 до 27 А), который соответствует минимальным геометрическим размерам (не более 95 мм по уровню мощности $1/e$) и наилучшей фокусировке пучка. Аналогичные измерения выполнены для всего рабочего диапазона прикладываемого ускоряющего напряжения 30–50 кВ в широком интервале токов пучка как для водородной, так и для дейтериевой инжекции. Результаты проведенных экспериментов представлены на рис. 13. В итоге, диаметр как водородного, так и дейтериевого пучка на калориметре не превышает 110 мм по уровню мощности $1/e$ для всего рабочего диапазона прикладываемого ускоряющего напряжения, а профиль мощности пучка имеет гауссову форму.

Для оптимального по фокусировке дейтериевого пучка с энергией частиц 50 кэВ измерен его энергетический спектр с помощью спектроскопической диагностики доплеровского сдвига линий излучения. Методика измерений подробно описана в [18]. В инжекторе НИ-2 для сбора излучения, рожденного вследствие взаимодействия частиц инжектируемого пучка с остаточным газом, предусмотрен специальный порт, расположенный со стороны калориметра. С помощью объектива, к выходу которого подсоединен оптоволоконный кабель, через этот порт навстречу направлению распространения пучка собирается

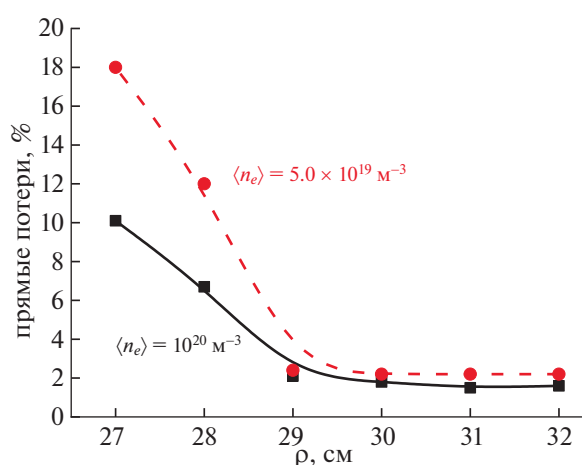


Рис. 9. Зависимость прямых потерь быстрых частиц с энергией 40 кэВ от прицельного параметра инжектора НИ-2 при $B_t = 0.7$ Тл и $I_p = 0.3$ МА для случая $\langle n_e \rangle = 5.0 \times 10^{19}$ (точки и штриховая линия) и $1.0 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$ (квадраты и сплошная линия).

свет. Как было отмечено ранее, при прохождении пучка через перезарядную мишень в нейтрализаторе преимущественно образуются быстрые атомы D_1^0 трех различных энергий E , $E/2$, $E/3$ (E — основная энергия) соответственно из быстрых ионов D_1^+ , D_2^+ , D_3^+ . На выходе из нейтрализатора магнитным полем из пучка удаляются заряженные частицы. Оставшиеся в пучке атомы из-за соударений с фоновым газом возбуждаются и излучают линию D_α . При регистрации излучения наблюдают 5 линий: одна соответствует несдвинутой линии D_α от фонового газа; три других, сильно смещенных в результате эффекта Доплера, соответствуют частицам со скоростями $\sqrt{2}v$, $v/\sqrt{2}$, $v/\sqrt{3}$ ($v = \sqrt{2E/M}$, M — масса частиц пучка) и одна — примесным добавкам, как правило, с энергией $E/10$. Это излучение собирается оптоволоконным спектрометром. Оптический метод определения очень удобен (главное преимущество — бесконтактность), так как позволяет определять состав пучка непосредственно во время плазменного эксперимента. Пример спектра излучения за выстрел дейтериевого пучка с $E = 50$ кэВ (время экспозиции 100 мс) приведен на рис. 14. Полученный энергетический спектр был обработан и подвергнут анализу, который показал, что 36% относительной доли переносимого тока в атомарном пучке приходится на компонент с основной энергией, на компонент с энергией $E/2$ — 40%, на компонент с энергией $E/3$ — 22%, а на компонент с энергией $E/10$ — 2%.

Мощность атомного пучка P_{nb} на выходе инжектора представляет сумму мощностей трех основных компонентов с энергией E , $E/2$, $E/3$ и примесного с энергией $E/10$. P_{nb} можно приблизительно рассчитать, зная мощность ионного пучка $P_{ib} = U_{beam} I_{beam}$, которая составляет 1.35 МВт для дейтериевого пучка в режиме работы инжектора, представленном на рис. 10. При этом необходимо учесть потери на преобразование ионного пучка в атомный в камере перезарядки η_{io} , а также потери на транспортировку и обрезание части пучка проходными диафрагмами инжектора η_{tr} . В результате

$$P_{nb} = \eta_{io} \eta_{tr} P_{ib}.$$

Параметр η_{tr} зависит от фокусировки, прицельного положения оси пучка относительно оси атомпровода и потерь на реионизацию (то есть от вакуумных условий вдоль атомного тракта пучка) и составляет 0.85–0.95. Параметр η_{io} определяется сечениями атомных процессов, происходящих в нейтрализаторе, зависит от энергии ионов и, следовательно, компонентного состава ионного пучка с учетом различной эффективности нейтрализации его компонентов, а также оптимально подобранной “оптической” толщины газовой мишени

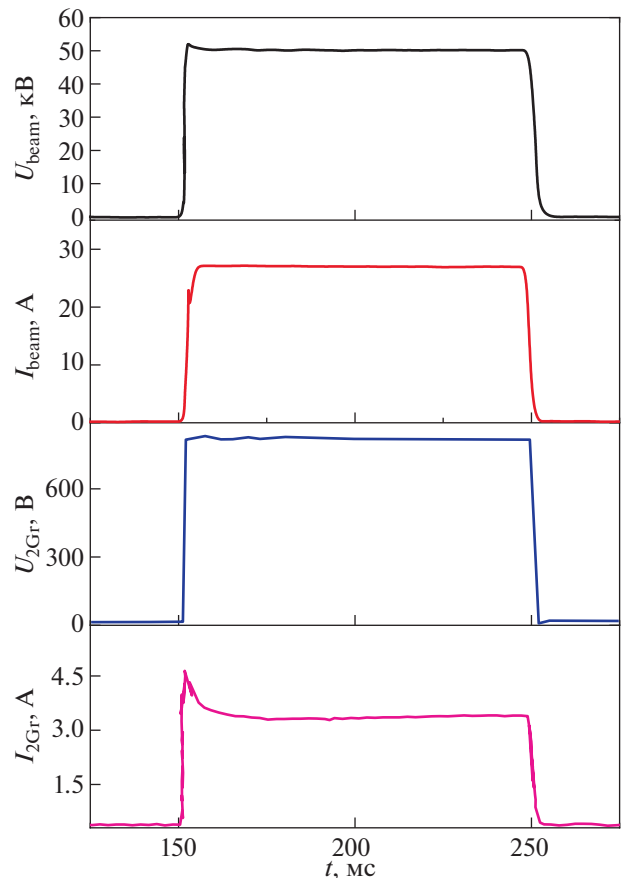


Рис. 10. Осциллограммы основных сигналов системы электропитания инжектора НИ-2 во время генерации дейтериевого пучка длительностью 100 мс: U_{beam} — приложенное ускоряющее напряжение; I_{beam} — полный ток ионного пучка; U_{2Gr} — отрицательное напряжение второй сетки; I_{2Gr} — ток нагрузки второй сетки.

и равняется 0.5–0.8 (при $U_{beam} = 20$ –50 кВ). Для компонента с основной энергией (50 кэВ) дейтериевого пучка D^+ коэффициент нейтрализации составляет 76%, для компонента с половинной энергией D_2^+ — 84%, для компонента с энергией в одну треть D_3^+ — 87%, для компонента с энергией в одну десятую D_2O^+ — 92% [11]. Компонентный состав ионного пучка (то есть величины относительных долей переносимого тока каждым из его компонентов) определяют с помощью спектроскопии доплеровского сдвига: для 50 кэВ дейтериевого пучка D^+ : D_2^+ : D_3^+ : D_2O^+ = 0.36: 0.40: 0.22: 0.02 при оптимальном вытягиваемом ионном токе 27 А. Таким образом, на компонент D^+ приходится 9.7 А, на компонент D_2^+ — 10.8 А, на компонент D_3^+ — 5.9 А, а на компонент D_2O^+ — 0.6 А. Приняв во внимание разный равновесный коэффициент нейтрализации для каждого энергетиче-

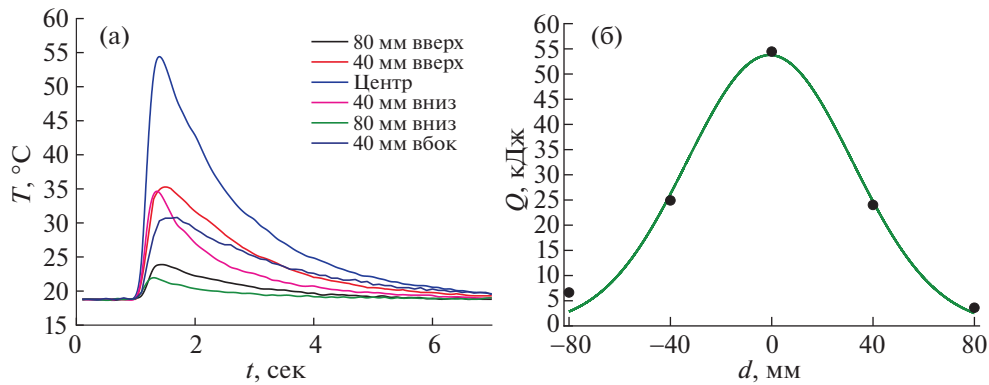


Рис. 11. Температурная зависимость от времени сигналов с термопар левой створки калориметра (а) и рассчитанный на основе этих данных профиль мощности пучка (б).

ского компонента ионного пучка, получают параметр

$$\eta_{io} = 0.36 \times 0.76 + 0.40 \times 0.84 + 0.22 \times 0.87 + 0.02 \times 0.92 = 0.82$$

В результате мощность 50 кэВ дейтериевого пучка на выходе инжектора составляет 1.00 ± 0.05 МВт.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ИНЖЕКЦИЕЙ ДВУХ АТОМНЫХ ПУЧКОВ В ПЛАЗМУ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2

В соответствии с выбранной схемой (рис. 8) проведена серия экспериментов по дополнительному нагреву дейтериевой плазмы токамака Глобус-М2 двумя дейтериевыми пучками НИ-1 и НИ-2. Плазма установки имела диверторную конфигурацию, смещение центра внешней магнитной поверхности по большому радиусу отно-

сительно геометрического центра камеры составляло -2 см, $B_t = 0.9$ Тл, $I_p = 0.4$ МА. Нейтральный пучок НИ-2 мощностью 0.95 МВт с энергией частиц 46 кэВ включался на 150 мс разряда на стадии роста тока плазмы, при этом постепенно увеличивался суммарный поток мощности через границу плазмы, что приводило к возникновению L–H-перехода. Дейтериевый пучок НИ-1 мощностью 0.5 МВт с энергией частиц 28 кэВ инжектировали на 180 мс разряда на стадии плато тока плазмы, что вызывало сильное повышение температуры ионов и, как следствие, увеличение запасенной в плазме энергии. К моменту начала инжекции НИ-1 средняя плотность плазмы составляла $5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. На рис. 15 показаны пространственные распределения электронной и ионной температур, а также профиль концентрации электронов, измеренные в разряде № 42416 в экваториальной плоскости токамака. Температу-

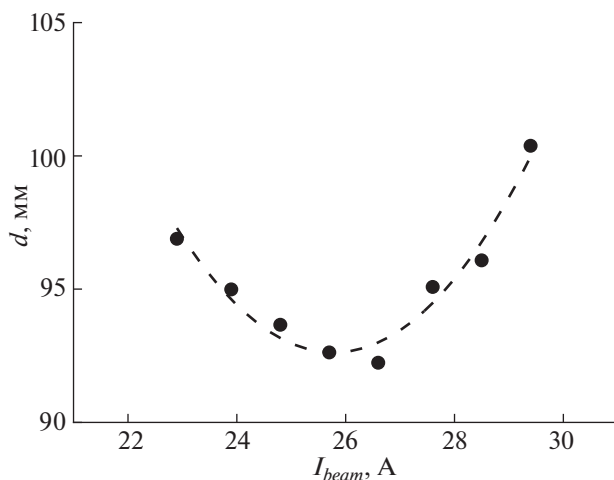


Рис. 12. Зависимость ширины пучка по уровню мощности I/e от его тока.

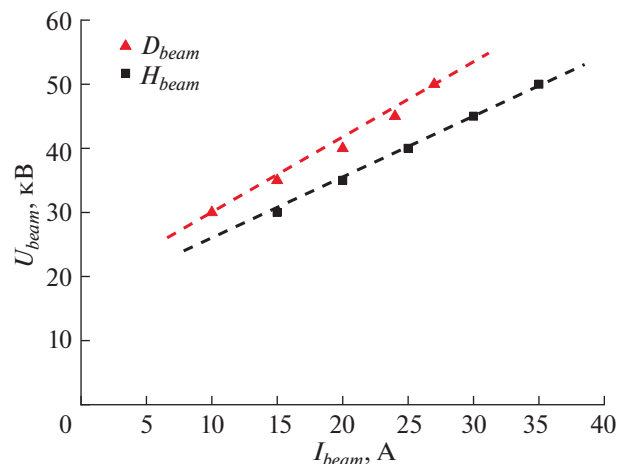


Рис. 13. Зависимость оптимального тока пучка от приложенного ускоряющего напряжения инжектора НИ-2.

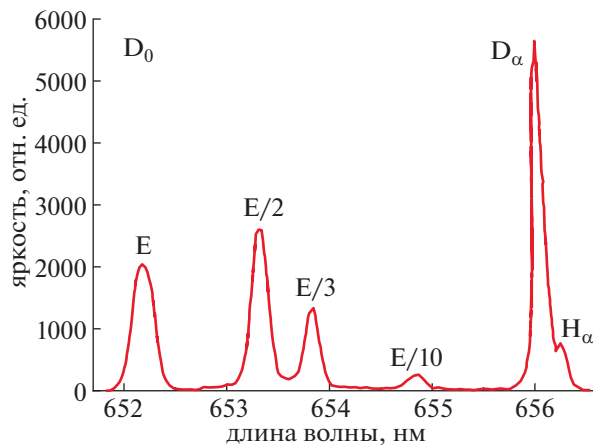


Рис. 14. Спектр излучения дейтериевого атомарного пучка с основной энергией частиц $E = 50$ кэВ.

ра ионов, измеренная с помощью CXRS-диагностики [19] по линии излучения пятикратно ионизированного примесного иона углерода C^{5+} (длина волны излучения $\lambda_0 = 5290.525$ Å), хорошо согласуется с данными активной диагностики NPA [20], измерения которой локализованы в области пересечения пучка НИ-1 с линией наблюдения NPA. Обе диагностики демонстрируют повышение температуры ионов до 4 кэВ при инжекции второго пучка. Электронная температура на оси плазмы, измеренная с помощью диагностики томсоновского рассеяния (TS) [21], почти не изменяется и остается на уровне 1.5 кэВ в течение всего периода инжекции пучка НИ-1, при этом плотность плазмы значительно возрастает. Данные диагностики CXRS показывают, что инжекция нейтральных пучков в плазму передает ей значительный крутящий момент, в результате че-

го в приосевой области скорость тороидального вращения плазмы в разряде № 42416 достигает 140 км/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате модернизации комплекса нейтральной инжекции токамака Глобус-М2 установлен второй инжектор атомов НИ-2 и усовершенствован существующий инжектор атомов НИ-1.

Для инжектора НИ-1 разработан новый трех-электродный ионный источник ИПМ-3, который отличается от предшественников ИПМ-1 и ИПМ-2 конструкцией высоковольтного изоляторного узла и щелевой ионно-оптической системы, но сохраняет при этом преимущества плазменного эмиттера с использованием дугового разряда. ИПМ-3 позволит инжектировать в плазму токамака пучок атомов с энергией до 40 кэВ и мощностью до 1 МВт. На сегодняшний день ВИУ в сборе с ИОС источника ИПМ-3 находится на заключительном этапе изготовления, а его ГРК полностью подготовлена к работе. Параллельно проведена реновация ионно-оптической системы источника ИПМ-2, в результате которой удалось добиться хорошей фокусировки пучка. Его поперечные размеры на приемнике пучка/калориметре составили 70×170 мм (на уровне 90% мощности), а полная инжектируемая мощность дейтериевого пучка достигла 0.5 МВт.

Для инжектора НИ-2 выполнен анализ возможных вариантов геометрии инжекции, и на его основе разработана схема эксперимента по вводу в разряд токамака второго пучка атомов высокой энергии. Оба атомных пучка от двух инжекторов было решено направить вдоль тока плазмы (ко-инжекция). На основе проведенных расчетов

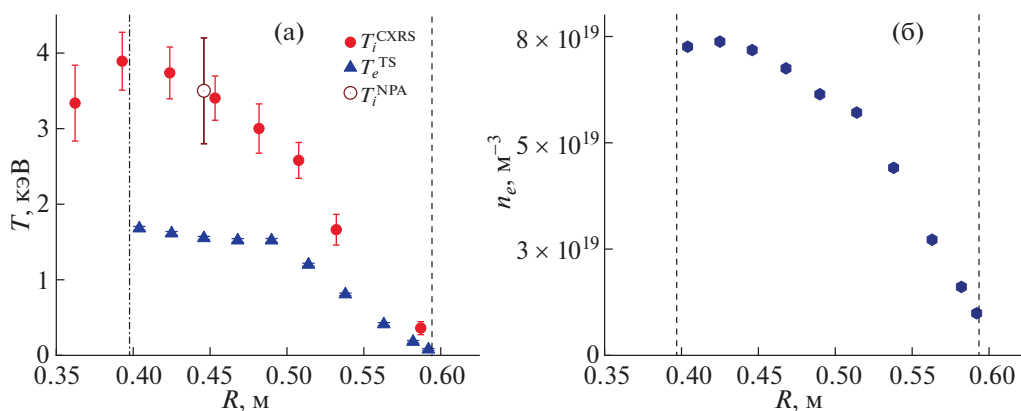


Рис. 15. Пространственные распределения электронной и ионной температур (а), профиль плотности электронов (б), измеренные на 192 мс разряда № 42416 при $B_t = 0.9$ Тл и $I_p = 0.4$ МА с дейтериевой инжекцией (пучок НИ-1: мощность 0.5 МВт, энергия 28 кэВ; пучок НИ-2: мощность 0.95 МВт, энергия 46 кэВ). Вертикальная линия слева соответствует положению магнитной оси, справа — последней замкнутой магнитной поверхности.

прямых потерь быстрых частиц и с учетом конструктивных ограничений прицельный параметр инжектора НИ-2 был выбран равным 30 см. В соответствии с выбранной схемой эксперимента произведена сборка и установка инжектора НИ-2 и всех его вспомогательных систем в экспериментальном зале токамака. Осуществлена их наладка и проверка. Произведена стыковка инжектора НИ-2 к камере токамака. Проведены пусконаладочные работы, в ходе которых инжектор НИ-2 выведен на проектные параметры. Получен пучок атомов дейтерия с энергией частиц 50 кэВ и измерены его электротехнические характеристики. Для указанного пучка произведен подбор оптимального тока (27 А), соответствующего его минимальным геометрическим размерам (не более 95 мм по уровню мощности $1/e$) и наилучшей фокусировке. С помощью спектроскопической диагностики для сфокусированного дейтериевого пучка с энергией частиц 50 кэВ измерен энергетический спектр, на основе которого рассчитана мощность пучка на калориметре, которая составила 1.00 ± 0.05 МВт. Проведены измерения оптимального тока пучка во всем рабочем диапазоне прикладываемого ускоряющего напряжения 30–50 кВ как для водородной, так и для дейтериевой инжекции. В итоге, диаметр как водородного, так и дейтериевого пучка на калориметре не превышает 110 мм по уровню мощности $1/e$ во всем рабочем диапазоне прикладываемого ускоряющего напряжения, а профиль мощности пучка имеет гауссову форму.

В результате для проведения экспериментов по дополнительному нагреву плазмы на установке Глобус-М2 введен в эксплуатацию и выведен на проектные параметры новый инжектор атомов высокой энергии НИ-2, способный генерировать пучок атомов водорода или дейтерия с энергией частиц до 50 кэВ при длительности импульса до 1 с.

В экспериментах по дополнительному нагреву плазмы токамака Глобус-М2 посредством инжекции двух пучков атомов НИ-1 и НИ-2 получен стабильный воспроизводимый режим работы с высокой ионной температурой T_i порядка 4 кэВ, значительно превышающей электронную T_e 1.5 кэВ. Это достижение позволило приблизиться к области экспериментальных параметров, характерных для термоядерного реактора.

Работы проведены на УНУ “Сферический токамак Глобус-М”, входящей в состав ФЦКП “Материаловедение и диагностика в передовых технологиях”. Исследования в разделе “Подготовка к экспериментам и вывод на проектные параметры инжектора атомов НИ-2” выполнены в рамках государственного задания 0040-2019-0023. Разработка новой трехэлектродной ИОС ионного источника ИПМ-3 частично выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образова-

ния РФ в рамках государственного задания (шифр научной темы FWGM-2022-0016). Эксперименты с инжекцией двух атомных пучков в плазму токамака Глобус-М2 выполнены в рамках государственного задания 0034-2021-0001.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

У авторов нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Minaev V.B., Gusev V.K., Sakharov N.V., Varfolomeev V.I., Bakharev N.N., Belyakov V.A., Bondarchuk E.N., Brunkov P.N., Chernyshev F.V., Davydenko V.I., Dyachenko V.V., Kavin A.A., Khitrov S.A., Khromov N.A., Kiselev E.O., Konovalov A.N., Kornev V.A., Kurskiev G.S., Labusov A.N., Melnik A.D., Mineev A.B., Mironov M.I., Miroshnikov I.V., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Rozhansky V.A., Saveliev A.N., Senichenkov I.Yu., Shchegolev P.B., Shcherbinin O.N., Shikhovtsev I.V., Sladkome-dova A.D., Solokha V.V., Tanchuk V.N., Telnova A.Yu., Tokarev V.A., Tolstyakov S.Yu., Zhilin E.G. // Nucl. Fusion. 2017. V. 57. P. 066047. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa69e0>
2. Gusev V.K., Golant V.E., Gusakov E.Z., D'yachenko V.V., Irzak M.A., Minaev V.B., Mukhin E.E., Novokhatskii A.N., Podushnikova K.A., Razdobarin G.T., Sakharov N.V., Tregubova E.N., Uzlov V.S., Shcherbinin O.N., Belyakov V.A., Kavin A.A., Kostsov Yu.A., Kuz'min E.G., Soikin V.F., Kuznetsov E.A., Yagnov V.A. // Tech. Phys. 1999. V. 44. № 9. P. 1054. <https://doi.org/10.1134/1.1259469>
3. Gusev V.K., Dech A.V., Esipov L.A., Minaev V.B., Barsukov A.G., Igon'kina G.B., Kuznetsov V.V., Panasenkov A.A., Sokolov M.M., Tilinin G.N., Lupin A.V., Markov V.K. // Tech. Phys. 2007. V. 52. № 9. P. 1127. <https://doi.org/10.1134/S1063784207090058>
4. Heidbrink W.W., Sadler G.J. // Nucl. Fusion. 1994. V. 34. № 4. P. 535. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/34/4/I07>
5. Kurskiev G.S., Miroshnikov I.V., Sakharov N.V., Gusev V.K., Petrov Yu.V., Minaev V.B., Balachenkov I.M., Bakharev N.N., Chernyshev F.V., Goryainov V.Yu., Kavin A.A., Khromov N.A., Kiselev E.O., Krikunov S.V., Lobanov K.M., Melnik A.D., Novokhatskii A.N., Filipov S.V., Zhiltsov N.S., Mineev A.E., Mukhin E.E., Patrov M.I., Petrov A.V., Ponomarenko A.M., Solokha V.V., Shulyatiev K.D., Shchegolev P.B., Skrekel O.M., Telnova A.Yu., Tkachenko E.E., Tukhmeneva E.A., Tokarev V.A., Tolstyakov S.Yu., Varfolomeev V.I., Voronin A.V., Yashin A.Yu., Solovey V.A., Zhilin E.G. // Nucl. Fusion. 2022. V. 62. № 10. P. 104002. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac881d>
6. Petty C.C., Wade M.R., Kinsey J.E., Groebner R.J., Luce T.C., Staebler G.M. // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 83. № 18. P. 3661
7. Fasoli A., Gormenzano C., Berk H.L., Breizman B., Briguglio S., Darrow D.S., Gorelenkov N., Heidbrink W.W., Jaun A., Konovalov S.V., Nazikian R., Noterdaeme J.M., Sharapov S., Shinohara K., Testa D., Tobita K., Todo Y., Vlad G., Zonca F. // Nucl. Fusion. 2007. V. 47. № 6.

- P. S264.
<https://doi.org/10.1088/0029-5515/47/6/S05>
8. Schlossberg D.J., McKee G.R., Fonck R.J., Burrell K.H., Gohil P., Groebner R.J., Shafer M.W., Solomon W.M., Wang G. // *Phys. Plasmas*. 2009. V. 16. № 8. P. 080701. <https://doi.org/10.1063/1.3192766>
 9. Shchegolev P.B., Minaev V.B., Telnova A.Yu., Bakharev N.N., Goncharov P.R., Gusev V.K., Kurskiev G.S., Miroshnikov I.V., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Shikhovtsev I.V., Tolstyakov S.Yu. // *J. Phys. Conf. Ser.* 2017. V. 907. № 1. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/907/1/012013>
 10. Sorokin A., Belov V., Davydenko V., Deichuli P., Ivanov A., Podymnugin A., Shikhovtsev I., Shulzhenko G., Stupishin N., Tiunovet M. // *Rev. Sci. Instrum.* 2010. V. 81. № 2. P. 02B108. <https://doi.org/10.1063/1.3266141>
 11. Семашко Н.Н., Владимиров А.Н., Кузнецов В.В., Кулыгин В.М., Панасенков А.А. Инжекторы быстрых атомов водорода. М.: Энергоиздат, 1981.
 12. Bakharev N.N., Balachenkov I.M., Chernyshev F.V., Chugunov I.N., Dyachenko V.V., Gusev V.K., Iliasova M.V., Khilkevitch E.M., Khromov N.A., Kiselev E.O., Konovalov A.N., Kurskiev G.S., Minaev V.B., Melnik A.D., Miroshnikov I.V., Novokhatsky A.N., Patrov M.I., Petrov Y.V., Sakharov N.V., Shchegolev P.B., Shevelev A.E., Skrekel O.M., Telnova A.Y., Tokarev V.A., Tolstyakov S.Y., Tukhmeneva E.A., Varfolomeev V.I., Voronin A.V. // *Plasma Phys. Reports*. 2020. V. 46. № 7. P. 675–682. <https://doi.org/10.1134/S1063780X20070016>
 13. Boers J.E. // *Proc. IEEE Particle Accelerator Conference*, New York: American Physical Society. 1995. P. 2312
 14. Telnova A.Y., Minaev V.B., Shchegolev P.B., Razumenko D.V., Kurskiev G.S., Lupin A.V. // *Tech. Phys.* 2017. V. 62. № 7. P. 1112–1118. <https://doi.org/10.1134/S1063784217070246>
 15. Telnova A.Yu., Minaev V.B., Panasenkov A.A., Shchegolev P.B. // *Tech. Phys.* 2022. V. 92. № 4. P. 449. <https://doi.org/10.21883/TP.2022.04.53600.292-21>
 16. Bakharev N.N., Chernyshev F.V., Goncharov P.R., Gusev V.K., Iblyaminova A.D., Kornev V.A., Kurskiev G.S., Melnik A.D., Minaev V.B., Mironov M.I., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Shchegolev P.B., Tolstyakov S.Y., Zadviitskiy G.V. // *Nucl. Fusion*. IOP Publishing, 2015. V. 55. № 4. P. 43023. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/55/4/043023>
 17. Telnova A.Yu., Minaev V.B., Shchegolev P.B., Bakharev N.N., Shikhovtsev I.V., Varfolomeev V.I. // *J. Phys. Conf. Ser.* 2019. V. 1400. № 7. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1400/7/077015>
 18. Щеголев П.Б., Минаев В.Б., Мирошников // *НТБ СПбГПУ*. 2012. Т. 4. № 158. С. 79–84
 19. Петров Ю.В. в этом выпуске
 20. Bakharev N.N., Balachenkov I.M., Chernyshev F.V., Gusev V.K., Kiselev E.O., Kurskiev G.S., Melnik A.D., Minaev V.B., Mironov M.I., Nesenevich V.G., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Shchegolev P.B., Skrekel O.M., Telnova A.Yu., Tukhmeneva E.A., Varfolomeev V.I. // *Plasma Phys. Control Fusion*. 2021. V. 63. № 12. P. 125036. <https://doi.org/10.1088/1361-6587/ac3497>
 21. Kurskiev G.S., Zhiltsov N.S., Koval A.N., Kornev A.F., Makarov A.M., Mukhin E.E., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Solovey V.A., Tkachenko E.E., Tolstyakov S.Yu., Chernakov P.V. // *Tech. Phys. Letters*. 2022. V. 48. № 15. P. 78–82. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.24.51799.19019>