

УДК 533.9.07:533.924:621.039.643

ПРОЕКТ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С МАТЕРИАЛАМИ НА ОСНОВЕ ВЧ-ИСТОЧНИКА ГЕЛИКОННОГО ТИПА

Д.И. Черкез, Н.П. Бобырь, А.В. Спицын, С.С. Ананьев

НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

В работе представлены результаты проектирования экспериментальной плазменной установки на основе источника плазмы с индукционным ВЧ-разрядом геликонного типа. Установка предназначена для изучения взаимодействия плазмы с перспективными материалами термоядерных реакторов в НИИ «Курчатовский институт». Ожидается, что спроектированная высоковакуумная установка позволит достичь плотности плазмы в диапазоне 10^{17} — 10^{19} м⁻³ при величине магнитного поля на оси до 0,3 Тл, а использованные при проектировании технические решения позволят получить плотность потока ионов дейтерия на исследуемый образец размером до 20×20 мм в диапазоне 10^{20} — 10^{23} ионов/(с·м²) и обеспечить дозу облучения до 10^{27} ионов/м² при заданной температуре образца в диапазоне от 300 до 1000 К.

Ключевые слова: геликонный разряд, геликонная волна, плазменные источники, облучение плазмой, материалы ТЯР.

THE DESIGN OF THE PLASMA FACILITY BASED ON RF-SOURCE HELICON TYPE FOR STUDYING THE PLASMA-MATERIALS INTERACTION

D.I. Cherkez, N.P. Bobyr, A.V. Spitsyn, S.S. Ananyev

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

The paper presents the conceptual design of the plasma facility based on a plasma source with RF induction discharge of a helicon type. The facility will be built at the Kurchatov Institute and designed for study the processes of plasma interaction with advanced materials of a fusion reactors. The designed facility will allow achieving a plasma density of 10^{17} — 10^{19} m⁻³ at 0.3 T of a magnetic field on the axis. The flux of deuterium ions will be in the range of 10^{20} — 10^{23} ions/(s·m²) on the sample up to 20×20 mm and provide a fluence up to 10^{27} ions/m² at the sample temperature in the range from 300 to 1000 K.

Key words: helicon discharge, helicon wave, plasma sources, plasma irradiation, fusion reactor materials.

DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-3-101-110

ВВЕДЕНИЕ

Источники низкотемпературной плазмы в настоящее время широко применяются в самых разнообразных областях науки и техники — как для бытовых и технологических применений (источники света, производство микроэлектроники, плазменная обработка материалов), так и в научных исследованиях, в частности, для экспериментального изучения воздействия плазмы на материалы, которые предполагается использовать для облицовки вакуумных камер установок термоядерного синтеза. Принцип действия плазменных источников, применяемых для исследования взаимодействия плазмы с поверхностью материалов, основывается на различных методах ионизации газа: ионизация молекул в тлеющем газовом разряде [1], ионизация газа электронным ударом (MAGNUM-PSI [2], PSI-2 [3], PISCES [4], STEP [5], NAGDIS [6], ЛЕНТА [7], ПР-2 [8], Плазменная установка НИУ «МЭИ» [9]), возбуждение высокочастотными (ВЧ) (MPXH [10, 11]) и сверхвысокочастотными (СВЧ) (PlaQ [12], ПИМ [13]) источниками тока и др. Для проведения прикладных исследований в области взаимодействия плазмы с поверхностью применительно к задачам термоядерных установок наиболее интересны высокопоточные плазменные генераторы, имитирующие плазменные потоки существующих и строящихся термоядерных реакторов [14]. Параметры некоторых плазменных установок, а также параметры пристеночной плазмы в диверторе ИТЭР обобщены в таблице.

Одним из самых распространённых источников плазмы для линейных плазменных генераторов (ЛПГ) является дуговой источник с накальным катодом, ресурс работы которого ограничен [2—6]. Важной особенностью разряда является генерация плазмы вблизи оси плазменной камеры, что позволяет минимизировать потери плазмы, снизить тепловые нагрузки на стенки камеры и использовать источники в непрерывном режиме. Установки такого типа в состоянии обеспечивать поток низкотемпературной плазмы плотностью до 10^{25} ионов/(с·м²), что сопоставимо с ожидаемыми потоками плазмы в перспектив-

Параметры плазменных источников для исследования взаимодействия плазмы с поверхностью

Установка	W , кВт	Магнитное поле, Тл	Температура электронов, эВ	Плотность электронов, м^{-3}	Поток ионов, $\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
ИТЭР-стенка	—	3,5	20	10^{19}	$5 \cdot 10^{20} - 5 \cdot 10^{21}$
ИТЭР-дивертор	—	5,5	<10	10^{21}	$10^{24} - 10^{25}$
MAGNUM-PSI (Dutch Institute for Fundamental Energy Research, Netherlands)	270	2,5	<10	$10^{19} - 10^{21}$	$10^{23} - 10^{25}$
MPEX (ORNL, USA)	100	1	<10	$10^{19} - 10^{20}$	$10^{23} - 10^{24}$
PSI-2 (Forschungszentrum Jülich, Germany)	50	0,1	<20	$10^{17} - 10^{19}$	$10^2 - 10^{23}$
PISCES-B (University of California, USA)	85	0,04	50	$10^{17} - 10^{19}$	$10^{21} - 10^{23}$
STEP (Beihang University, China)	5	0,26	<40	$10^{16} - 10^{18}$	$10^{20} - 10^{22}$
NAGDIS-2 (Nagoya University, Japan)	10	0,25	10	$10^{18} - 10^{19}$	$10^{21} - 10^{22}$
PR-2 (НИЯУ МИФИ)	12	0,1	<10	$10^{18} - 10^{19}$	$10^{20} - 10^{22}$
Плазменная установка НИУ «МЭИ» (Россия)		0,06	4	10^{18}	$3 \cdot 10^{21}$
ЛЕНТА (НИЦ «Курчатовский институт»)	8	0,2	5	$10^{18} - 10^{19}$	$10^{20} - 10^{21}$
PlaQ (IPP, Garching, Germany)	1,2	0,0875	5	$10^{16} - 10^{17}$	$10^{19} - 10^{20}$
ПИМ (НИЦ «Курчатовский институт»)	~1	0,0875	3—6	$10^{16} - 10^{17}$	$10^{19} - 10^{20}$

ных термоядерных реакторах (ТЯР). Однако такие установки достаточно крупные, технически сложные, потребляют значительную электрическую мощность в десятки и сотни кВт на создание магнитных полей и электронного пучка, должны обслуживаться коллективом технических специалистов и дорогие в эксплуатации. Кроме того, распылённый материал катода вносит в плазму примеси, которые могут оседать на поверхностях исследуемых образцов.

В то же время существует ряд задач по исследованию взаимодействия плазмы с материалами, для которых не требуются столь высокие плазменные потоки. К таким задачам относятся изучение фундаментальных и прикладных аспектов процессов распыления материалов ТЯР и модификации поверхности, накопления изотопов водорода, включая процессы изотопного обмена, и поиск эффективных способов детритизации поверхности при умеренных плазменных потоках. Для таких исследований необходим доступный и простой в эксплуатации лабораторный источник плазмы, обеспечивающий стабильный и регулируемый в широких пределах поток плазмы с хорошо известными параметрами (ионный состав плазмы, потоки нейтральных атомов) для различных газов или их смесей, обеспечивая при этом отсутствие нежелательных с точки зрения конкретной экспериментальной задачи примесей.

К перспективному типу компактных плазменных источников для исследования взаимодействия плазмы с материалами можно отнести ВЧ-источники плазмы, в частности, с индукционным разрядом геликонного типа [15]. Достоинством подобных плазменных источников является возможность варьировать плотность плазмы (и соответственно потоки плазмы) в широких пределах, а также отсутствие эродирующих в ходе горения разряда электродов, что существенно влияет на чистоту плазмы. В то же время установки такого типа позволяют достигать плотности плазмы порядка $10^{17} - 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и отличаются компактностью [16].

Геликонные волны были впервые открыты в 1960-х гг. [17, 18], и в 1970 г. Бозвелл [19] впервые создал простой источник плотной плазмы с использованием этих волн, возбуждаемых индукционной антенной. Позднее им же было показано, что, используя ВЧ-источник мощностью 3,5 кВт с частотой 7 МГц в магнитном поле 0,075 Тл, возможно получение аргоновой плазмы плотностью 10^{20} м^{-3} [20].

Геликонные волны возникают в плазме с магнитным полем на частотах, удовлетворяющих условию

$$\omega_{Hi} \ll \omega_{LH} < \omega < \omega_{He} < \omega_p$$

где $\omega_{He} = 1,76 \cdot 10^7 B$ — циклотронная частота электрона; $\omega_{Hi} = \omega_{He} \frac{m_e}{m_i}$ — циклотронная частота иона;

$\omega_p \approx 5,64 \cdot 10^4 \sqrt{n}$ — частота Ленгмюра (плазменная частота); $\omega_{LH} \approx \sqrt{\omega_{He} \omega_{Hi}} \left(1 + \frac{\omega_{He}^2}{\omega_p^2} \right)^{-1}$ — частота

нижнего гибридного резонанса. Так, например, при концентрации плазмы $n = 10^{18} \text{ м}^{-3}$, величине магнитного поля $B = 0,01 \text{ Тл}$ для аргона получим $\omega_p \approx 5,6 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$, $\omega_{He} \approx 1,76 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$, $\omega_{Hi} \approx 2,4 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, $\omega_{LH} \approx 6,5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$, и в качестве рабочей частоты может использоваться стандартная частота 13,56 МГц. Геликонные волны обеспечивают объёмное поглощение энергии при бесстолкновительном затухании Ландау при выполнении условия $B > 3 \cdot 10^{-12} w_e R n$, где B (Гс) — магнитное поле в области разряда; n (см^{-3}) — плотность плазмы; w_e (эВ) — энергия электронов; R (см) — радиус плазменного столба. Подробная теория распространения и поглощения геликонных волн плазмой представлена в работе [21]. Таким образом, геликонные источники из-за отсутствия ограничений, связанных с глубиной скинирования, в отличие от обычного индукционного разряда позволяют получать плазму с более высокой плотностью при низком давлении рабочего газа. Перечисленные в этом разделе установки проектировались в 1990-х гг., когда физика геликонного разряда была недостаточно изучена, что не позволяло применять данную технологию для создания установок для исследования взаимодействия плазмы с поверхностью. В то же время современные источники плазмы широко используют эту технологию [10].

В рамках данной работы разработана концепция компактной установки с плазменным источником геликонного типа для исследования взаимодействия плазмы с перспективными материалами термоядерных реакторов. Ожидается, что установка позволит проводить облучение образцов материалов размером до $20 \times 20 \text{ мм}$ в диапазоне потоков дейтерия $10^{20} \text{—} 10^{21} \text{ ионов}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ при температуре от 300 до 1000 К и энергии ионов до 600 эВ в непрерывном режиме работы. Не исключается также и достижение более высокого потока ионов дейтерия вплоть до $10^{23} \text{ ионов}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ за счёт использования магнитной фокусировки плазменного потока на меньшую площадь образца и с худшей однородностью, что может быть оправдано в некоторых экспериментах. Таким образом, предлагаемая установка позволит достигать величины потоков плазмы на образец, который будет соответствовать установкам NAGDIS-2 и PISCES-B в условиях значительных ограничений по площади образцов и однородности облучения. Установка будет использовать в качестве рабочих газов водород или дейтерий, в том числе с примесями гелия, аргона или неона с заданными концентрациями.

ОБЩИЕ КОМПОНОВОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ

Для выполнения своего функционального назначения установка ГПИ-2 (геликонный плазменный источник, 2 кВт) будет состоять из двух соединённых друг с другом вакуумных камер — разрядной камеры и камеры взаимодействия, а также из системы высоковакуумной откачки, системы магнитных катушек и системы ВЧ-нагрева, включающей в себя ВЧ-генератор (2 кВт, 13,56 МГц), устройство автоматического согласования и антенну.

Разрядная камера. Для создания источника геликонной плазмы будет использоваться разрядная камера в виде кварцевой трубки с внешним диаметром 70 мм, один конец которой заглушен металлическим фланцем с системой напуска рабочего газа (рис. 1), другой конец соединён с камерой взаимодействия. Непосредственное соединение кварцевой трубки с металлическим фланцем осуществляется через сальниковое уплотнение с использованием кольца круглого сечения из фторированного каучука 3, прижимного фланца 1, а также кольца из фторопласта 2. Такое уплотнение исключает возможность прямого контакта кварцевой трубки с металлической стенкой. По внешней поверхности кварцевой трубки внутри магнита располагается антенна 4, которая через устройство согласования подключена к ВЧ-генератору.

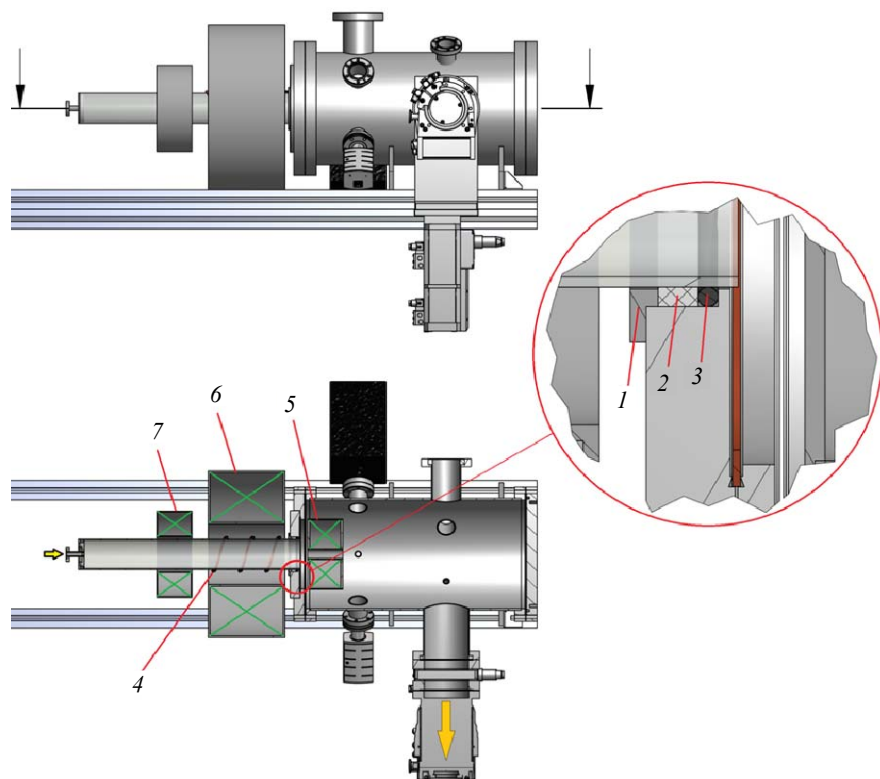


Рис. 1. Принципиальная схема плазменного источника ГПИ-2: 1 — прижимной фланец; 2 — кольцо из фторопласта; 3 — уплотняющее кольцо из фторированного каучука; 4 — антенна; 5, 6, 7 — катушки магнитного поля

Расчёт тепловых нагрузок на стенку разрядной камеры проводился в предположении, что вся ВЧ-мощность, излучаемая антенной, вкладывается в плазму и в виде излучения и плазмы передаётся на внутреннюю поверхность разрядной камеры в области расположения ВЧ-антенны. Учитывая то, что длина антенны составляет ~20 см, площадь внутренней поверхности, воспринимающей нагрузку до 2 кВт, составит около 0,04 м². Таким образом, максимальная плотность теплового потока составит 50 кВт/м². Для цилиндрической геометрии максимальный перепад температур при толщине стенки кварцевой трубки 2,5 мм не будет превышать 42 К. Расчёты также показали, что даже в случае максимального вклада ВЧ-мощности стенки разрядной камеры не потребуют внешнего охлаждения. Требуемый коэффициент теплоотдачи может быть обеспечен теплоотводом в режиме свободной конвекции.

Камера взаимодействия. Камера взаимодействия представляет собой цилиндрическую камеру из нержавеющей стали толщиной 4 мм с внутренним диаметром 250 мм и длиной 500 мм (рис. 2) с двумя фланцами DN250CF стандарта ConFlat, который допускает эксплуатацию в условиях сверхвысокого ва-

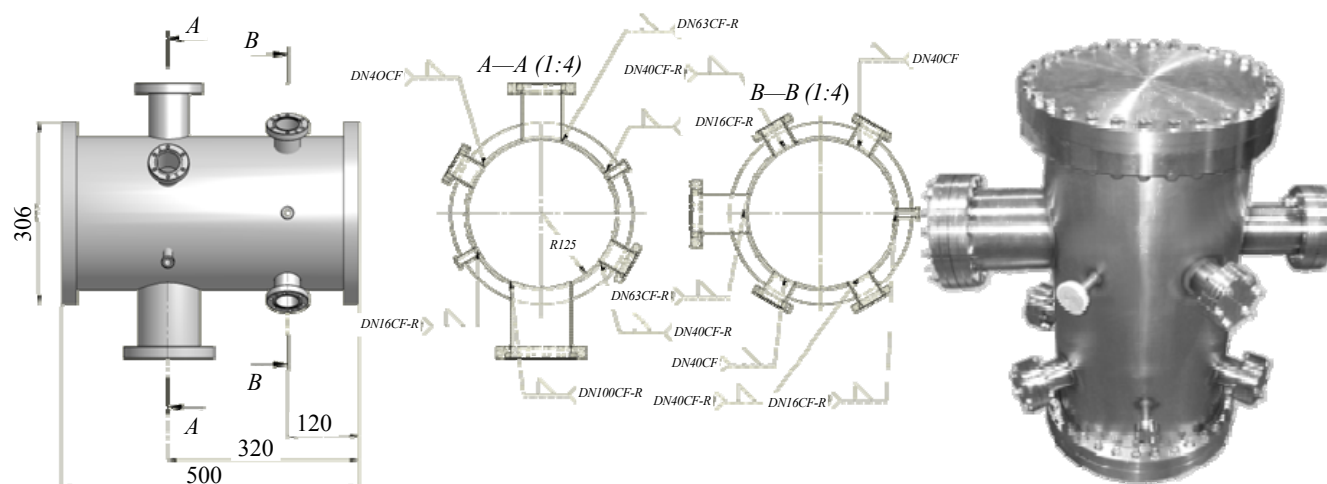


Рис. 2. Камера взаимодействия ГПИ-2

куума прогревах при температурах до 450°C , и несколькими фланцами проходного диаметра 63, 40 и 16 мм для размещения измерительной аппаратуры, диагностик (оптической, зондовой, времяпролётного масс-анализатора), системы откачки и шлюзовой камеры для загрузки исследуемых образцов.

Также один из фланцев с проходным диаметром 63 мм может быть использован для присоединения к нему мишенного узла с образцом для исследования проницаемости металлов при облучении дейтериевой плазмой. В этом случае поток газа, проникающий через исследуемый образец, через сильфонную линию может соединяться с камерой регистрации установки ПИМ [13], предназначенной для прецизионного измерения сверхмалых газовых потоков. В результате станут возможны эксперименты по плазменной проницаемости, в ходе которых при экспозиции входной поверхности исследуемого образца в плотной плазме проникающий поток изотопов водорода будет откачиваться и, таким образом, детектироваться системой регистрации газовых потоков установки ПИМ.

Выбор типа антенны и параметров плазменного источника. Для корректной эксплуатации ВЧ-генератора необходимо обеспечить хорошую согласованность генератора и ВЧ-нагрузки (антенны). В качестве ВЧ-источника был выбран генератор GL-13.2-7A отечественного производства [22] мощностью 2 кВт с частотой 13,56 МГц, в качестве устройства автоматического согласования — Navio Match Network 3155405-300 производства Advanced Energy (США) [23], допускающего эксплуатацию с генераторами мощностью до 5 кВт. В ВЧ-технике и электронике часто для описания и определения комплексного сопротивления нагрузки применяют диаграммы Смита [24]. На рис. 3 показана диаграмма для устройства согласования Navio Match Network 3155405-300. Видно, что устройство обладает широким диапазоном подстройки и находится в области индуктивных нагрузок от $j25$ до $j130$ Ом реактивного сопротивления, что для частоты 13,56 МГц соответствует индуктивностям ~ 300 и 1500 нГн соответственно. В то же время необходимо учитывать, что при горении разряда плазма также будет вносить вклад как в активную, так и в реактивную составляющую ВЧ-нагрузки, поэтому целесообразен подбор индуктивностей антенн и подводящих линий в более узком диапазоне от $j50$ до $j100$ Ом (~ 600 и 1200 нГн). Также стоит отметить, что в данном диапазоне устройство согласования позволяет гарантированно работать с активной составляющей ВЧ-нагрузки от ~ 1 до 30 Ом. Таким образом, возможно применение практически любой антенны, в частности, 2—5-витковой спирали высотой до 20 см и диаметром намотки до 100 мм. На начальном этапе работы установки планируется использование антенны, представляющей собой спираль из трёх витков с высотой спирали ~ 20 см. На дальнейших этапах предполагается оптимизация конфигурации антенны с целью повышения эффективности введения ВЧ-мощности.

Вакуумная система. Для создания и поддержания высокого вакуума в камере взаимодействия с учётом ожидаемых газовых потоков из плазменного источника был выбран турбомолекулярный насос HiPace 300 производства Pfeiffer Vacuum (Германия) со скоростью откачки по водороду 220 л/с и предельно допустимой газовой нагрузкой ~ 1400 Па·л·с $^{-1}$. В процессе работы необходимо обеспечить минимально возможное давление в камере взаимодействия не более 10^{-2} Па для минимизации концентрации нейтрального газа в камере и увеличения длины пробега ионов, вытягиваемых из плазмы в камере [25]. При этом работа в области верхнего предела диапазона давления в разрядной камере, характерного для геликонных источников 0,1—10 Па, приводит к высокой газовой нагрузке и повышенному расходу рабочего газа. В этом случае целесообразно использование диафрагм между камерой взаимодействия и разрядной камерой, выполняющих роль лимитера, коллимирующего поток плазмы из разрядной камеры и снижающего газовую нагрузку на систему откачки. Установка диафрагмы в области катушки магнит-

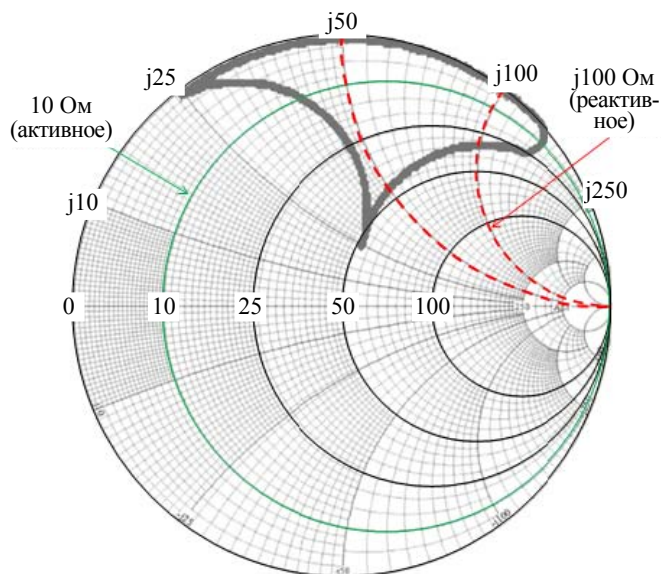


Рис. 3. Диаграмма Смита согласующего устройства Navio Match Network 3155405-300

ного поля (5 на рис. 1) позволит снизить эффективную скорость откачки из области разряда, повысить давление рабочего газа в разрядной камере и достичь более высокой плотности плазмы. На рис. 4 показаны расчётные профили давления по оси разрядной камеры и камеры взаимодействия установки ГПИ-2 при поддержании на свободном конце кварцевой трубки давления 1 Па. Оценки проведены для дейтерия в мо-

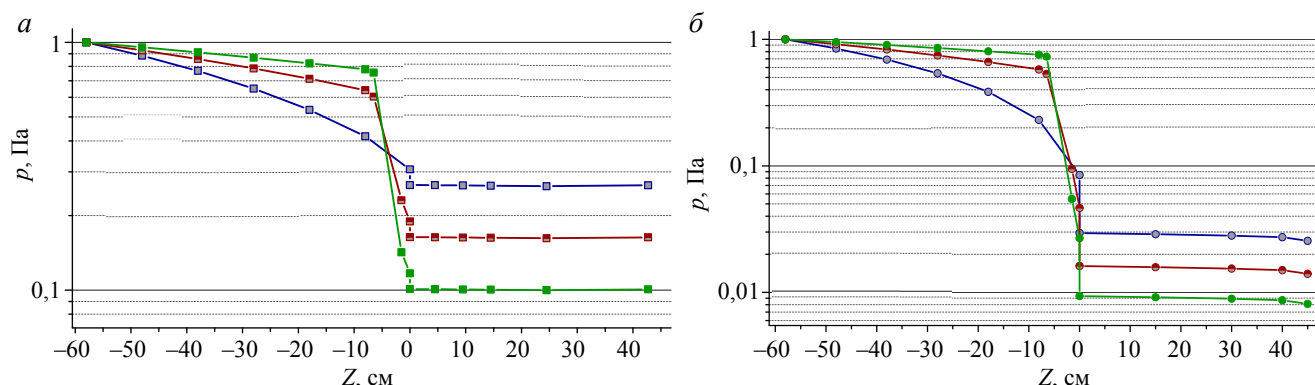


Рис. 4. Расчётный профиль давления в разрядной камере и камере взаимодействия установки ГПИ-2 в случае использования турбомолекулярного насоса: — 48,6 Па·л/с, без диафрагмы, — 30 Па·л/с, диафрагма 80 л/с, — 18,5 Па·л/с, диафрагма 30 л/с, $S_0 = 220$ л/с (а), и криосорбционного насоса: — 64,2 Па·л/с, без диафрагмы, — 35,2 Па·л/с, диафрагма 80 л/с, — 20,4 Па·л/с, диафрагма 30 л/с, $S_0 = 3000$ л/с (б). Расстояние отсчитывается от левого торца катушки 5 на рис. 1

лекулярном режиме течения газа и двух скоростей откачки S_0 — 220 л/с (ТМН) и 3000 л/с (крионасос при его установке на свободный фланец ДУ250). За координату 0 по оси Z принята точка, соответствующая правому торцу внутрикамерной катушки (5 на рис. 1) — области истечения плазмы в камеру взаимодействия. Для каждой скорости откачки построены профили давления для трёх случаев:

- без дополнительной диафрагмы (проходное отверстие внутрикамерной катушки 64 мм, длина образующей 8 см);
- диафрагма проводимостью 30 л/с по дейтерию (например, полая трубка длиной 5 см и проходным отверстием ~2 см);
- диафрагма проводимостью 80 л/с по дейтерию ($L = 5$ см, $d \sim 2,8$ см).

На рисунке также показаны величины расхода рабочего газа для всех рассмотренных вариантов. Видно, что применение диафрагм позволяет в несколько раз снизить газовую нагрузку на систему откачки, а также способствует достижению более равномерного распределения давления в разрядной камере. Стоит отметить, что с увеличением давления дейтерия до 10 Па в разрядной камере течение газа в кварцевой трубке будет проходить уже в режиме, близком к молекулярно-вязкостному, что будет способствовать увеличению проводимости трубки и, как следствие, получению более равномерного распределения давления в разрядной камере. Как видно на рис. 4, применение откачной системы с большей производительностью для данной конфигурации позволит достичь более глубокого вакуума в камере взаимодействия. Вакуумная система установки схематично показана на рис. 5.

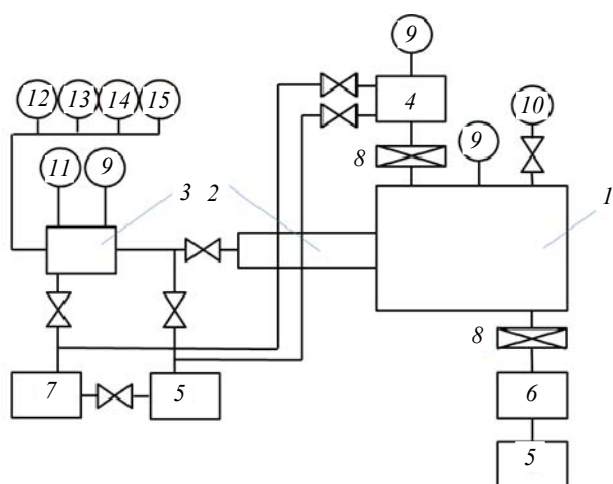


Рис. 5. Вакуумная схема ГПИ-2: 1 — камера взаимодействия; 2 — разрядная камера; 3 — система напуска газа; 4 — шлюзовая камера загрузки образцов; 5 — форвакуумный насос; 6, 7 — турбомолекулярный насос; 8 — шибер; 9 — широкодиапазонный датчик давления; 10 — квадрупольный масс-спектрометр; 11 — баратрон (датчик давления); 12—15 — объёмы с газом (Ar, He, H₂, D₂)

пределения давления в разрядной камере. Как видно на рис. 4, применение откачной системы с большей производительностью для данной конфигурации позволит достичь более глубокого вакуума в камере взаимодействия. Вакуумная система установки схематично показана на рис. 5.

Диагностические системы. Для правильной интерпретации результатов исследований взаимодействия плазмы с материалами и оптимизации плазменного источника в составе установки будут использоваться следующие диагностические системы:

- зонд Ленгмюра для измерения электронной температуры плазмы, а также потенциала плазмы;
- сеточный анализатор для измерения энергии ионов плазмы;
- набор приёмных пластин для измерения пространственного распределения потока плазмы в области размещения образца;
- система скоростной электронно-оптической регистрации собственного излучения плазмы с пространственным распределением в кадровом режиме;

- времяпролётный анализатор для измерения компонентного состава плазмы, в частности, соотношения одно-, двух- и трёхатомных ионов дейтерия в плазме;
- квадрупольный масс-спектрометр для контроля чистоты рабочего газа и его состава при использовании многокомпонентных смесей;
- датчик магнитных полей для измерения индукции магнитного поля.

Указанные диагностики позволят как контролировать параметры плазмы в процессе облучения образцов материалов, так и оптимизировать параметры плазменного источника, добиваясь максимального значения потока плазмы в области размещения образцов, а также его однородности.

Держатель образцов. При экспозиции экспериментальных образцов материалов ТЯР в плазме важными являются параметры, при которых происходит облучение, а именно температура образца, площадь облучения, плотность потока плазмы на образец, интегральная доза облучения. Для корректного определения этих параметров будет использован многоцелевой держатель образцов.

Держатель должен отвечать следующим требованиям:

- удобство и простота использования;
- возможность использования в высоковакуумной установке;
- возможность охлаждения образца;
- возможность нагрева образца;
- возможность контроля температуры.

Для сокращения времени на смену образцов была выбрана схема ввода образцов в камеру взаимодействия через шлюзовую камеру, смонтированную на стандартном фланце CF63. Таким образом, в процессе облучения образцы будут находиться на расстоянии до 120 мм от сечения выхода плазмы из разрядной камеры. Все материалы, используемые при изготовлении держателя, являются высоковакуумными: коррозионно-стойкая сталь 12X18H10T, медь, молибден, алундовая керамика.

В процессе облучения образцы будут нагреваться в результате торможения ионов в приповерхностном слое образцов. Выделяемая в образцах материалов тепловая энергия будет возрастать с увеличением потока и энергии ионов, ввиду чего предусмотрено водяное охлаждение задней поверхности площадки, к которой прижимаются образцы.

Для проведения экспериментов по облучению экспериментальных образцов при повышенных температурах предусмотрена возможность нагрева всей поверхности держателя, к которой прижимаются образцы. Нагреватель выполнен из нихромовой проволоки и позволяет регулировать температуру образцов в диапазоне от 300 до 1000 К.

Температура образцов контролируется двумя хромель-алюмелевыми термопарами, которые могут либо привариваться непосредственно к образцу, либо прижиматься маской.

Область облучения будет задаваться геометрическими размерами маски, которой образцы прижимаются к плоскости столика держателя. Подобная конфигурация держателя позволит облучать до четырёх образцов размером 10×10 мм одновременно или один образец размером 10×10 мм отдельно. Для предотвращения загрязнения поверхности облучаемых образцов целесообразно использовать материал маски, аналогичный или близкий по химическому составу к исследуемому материалу.

Магнитная конфигурация. Стоит отметить, что, несмотря на возможность горения геликонного разряда даже при относительно небольших величинах магнитного поля 0,002—0,01 Тл, эффективное введение ВЧ-мощности в плазму возможно только при достаточно значительном сопротивлении плазмы, которое зависит от многих параметров. Данное обстоятельство обусловлено относительной сложностью физики геликонного разряда [19] и наличием резонансных пиков в зависимости сопротивления плазмы от величины магнитного поля и плотности плазмы. Отмечена выраженная зависимость плотности геликонной плазмы от величины магнитного поля в области образования геликонных волн и геометрии [26], а также от давления газа [25, 27]. И только в случае учёта всех этих факторов можно ожидать рост плотности плазмы с ростом вложенной мощности [26, 27].

При создании установки ГПИ-2 будет использована система из трёх катушек 5, 6, 7, которые показаны на рис. 1. Катушка 6 находится в области антенны, обеспечивает магнитное поле до 0,08 Тл и служит для зажигания разряда, катушка 7 находится внутри вакуумной камеры (магнитное поле до 0,3 Тл) и используется для уменьшения диаметра плазменного потока и повышения плотности плазмы. Третья катушка 5 располагается с другой стороны антенны (магнитное поле до 0,3 Тл) и обеспечивает пробочную магнитную конфигурацию. Катушки 5 и 7 изготавливаются путём намотки медной трубки с внешним диаметром ≤10 мм на цилиндрический каркас из коррозионно-стойкой немагнитной стали. Элек-

трическая изоляция витков от каркаса и друг от друга осуществляется посредством использования электроизолирующих лаков. Расчётная величина тепловой мощности в режиме работы с максимальной напряжённостью магнитного поля катушек 5 и 7 не превышает 3 кВт и гарантированно может быть отведена с помощью водяного охлаждения. Использование комбинации из трёх катушек, две из которых располагаются вне вакуумной камеры, позволяет осуществлять оперативную перестройку профиля магнитного поля перемещением катушек, располагающихся вне вакуумной камеры, а также путём изменения величины тока через катушки. Ввиду того, что для плазменных источников подобного типа и конфигурации зачастую наблюдается пикированное аксиальное распределение плотности плазмы [25, 28], катушка 5 также может играть роль как магнитной, так и механической диафрагмы.

Озвученные соображения были заложены в проект установки. На рис. 6 показаны расчётные профили магнитных полей, которые будут получены с использованием магнитной системы из трёх катушек на первом этапе, и соответствующие им силовые линии. Как видно на рисунке, возможно получение как одно-, так и двухпробочной магнитной конфигурации, а также плоского профиля магнитного поля. Так

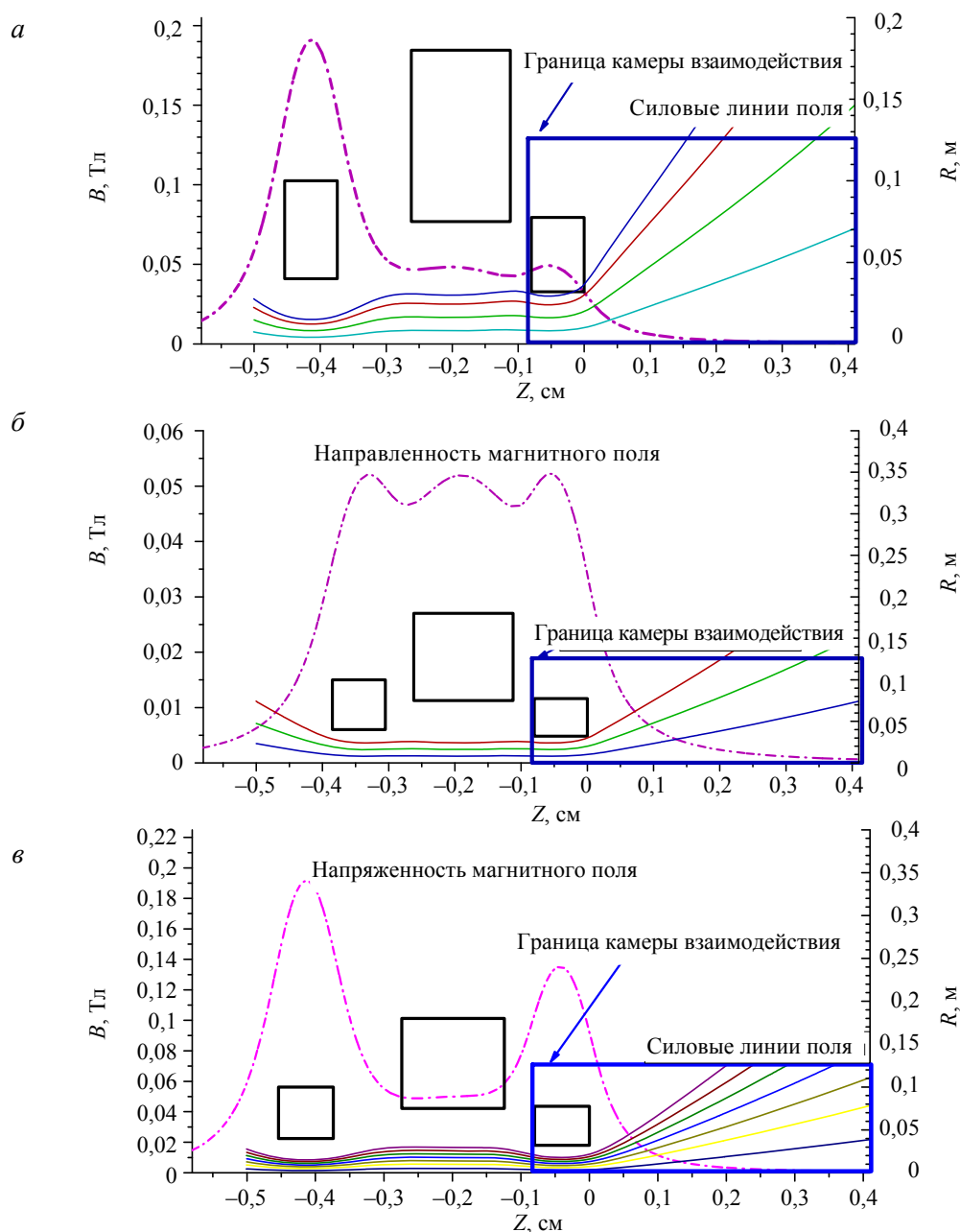


Рис. 6. Силовые линии и напряжённость магнитных полей установки ГПИИ-2 первого этапа. Показаны положение катушек магнитного поля (а), осевое распределение величины магнитной индукции (б) и силовые линии (в)

же, как и в случае с расчётными профилями давления, приведёнными на рис. 4, за точку ноль по оси Z принят правый торец катушки 5. В дальнейшем профили магнитных полей будут оптимизированы для достижения требуемых параметров плазмы в зоне расположения исследуемых образцов.

Применение ограничительных диафрагм позволяет снизить скорость эффективной откачки по водороду кварцевой трубки, увеличить рабочее давление в области разряда и тем самым увеличить плотность плазмы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан проект лабораторной экспериментальной установки на основе геликонного источника плазмы мощностью 2 кВт, предназначенной для исследования процессов при взаимодействии низкотемпературной плазмы с перспективными материалами термоядерных реакторов. Используемые при проектировании технические решения позволят получить плотность потока ионов дейтерия в камере взаимодействия в диапазоне 10^{20} — 10^{23} ионов/(с·м²). Заложенная возможность использования нескольких магнитных катушек с установкой одной из них внутрь камеры взаимодействия позволяет гибко варьировать профиль магнитного поля в процессе эксперимента и параметры плазмы в широких пределах в зависимости от потребностей эксперимента.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-72-10162.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alimov V.Kh., Hatano Y., Sugiyama K., Roth J. et al. The effect of displacement damage on deuterium retention in tungsten exposed to D neutrals and D₂ gas. — J. Nucl. Mater., 2013, vol. 438, p. S959—S962; <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.01.208>.
2. N. van Eck H.J., Akkermans G.R., van der Westen A.S. et al. High-fluence and high-flux performance characteristics of the superconducting Magnum-PSI linear plasma facility. — Fusion Engineering and Design, 2019, vol. 142, p. 26—32; <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.04.020>.
3. Kreter A., Brandt C., Huber A. et al. Linear plasma device PSI-2 for plasma material interaction studies. — Fusion Sci. Technol., 2015, vol. 68 (1); <https://doi.org/10.13182/FST14-906>.
4. Goebel D.M., Campbell G., Conn R.W. Plasma surface interaction experimental facility (PISCES) for materials and edge physics studies. — J. Nucl. Mater., 1984, vol. 121, p. 277; [http://dx.doi.org/10.1016/0022-3115\(84\)90135-1](http://dx.doi.org/10.1016/0022-3115(84)90135-1).
5. Lu G.H., Cheng L., Arshad K. et al. Development and optimization of STEP — a linear plasma device for plasma-material interaction studies. — Fusion Sci. Technol., 2017, vol. 71 (2), p. 177—186; <https://doi.org/10.13182/FST16-115>.
6. Ohno N. et al. Static and dynamic behaviour of plasma detachment in the divertor simulator experiment NAGDIS-II. — Nucl. Fusion, 2002, vol. 41, p. 1055; <http://dx.doi.org/10.1088/0029-5515/41/8/309>.
7. Khripunov B.I., Shapkin V.V., Petrov V.B., Antonov N.V. — Fusion Technology, 1994, p. 243—246.
8. Гуторов К.М., Визгалов И.В., Сорокин И.А., Подолько Ф.С. Исследование взаимодействия плазмы с материалами установок термоядерного синтеза в линейных симуляторах с пучково-плазменным разрядом. — Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2016, № 6, с. 43—48; <https://elibrary.ru/item.asp?id=26068833>.
9. Будаев В.П., Федорович С.Д., Лукашевский М.В., Мартыненко Ю.В., Губкин М.К., Карпов А.В. и др. Плазменная установка НИУ «МЭИ» для испытаний тугоплавких металлов и создания высокопористых материалов нового поколения. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2017, т. 40, вып. 3, с. 23—36.
10. Beers C.J., Lindquist E.G., Biewer T.M. et al. Characterization of the helicon plasma flux to the target of Proto-MPEX. — Fusion Engineering and Design, 2019, vol. 138, p. 282—288; <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.11.056>.
11. Rapp J., Biewer T. M., Bigelow T.S. The development of the material plasma exposure experiment. — IEEE Transactions on Plasma Science, 2016, vol. 44, Issue 12; doi:10.1109/tps.2016.2628326.
12. Manhard A., Schwarz-Selinger T., Jacob W. Quantification of the deuterium ion fluxes from a plasma source. — Plasma Sources Science and Technology, 2011, vol. 20, p. 015010.
13. Голубева А.В., Черкез Д.И., Спицын А.В., Янченков С.В. Установка для исследования проницаемости материалов при плазменном облучении. — Приборы и техника эксперимента, 2017, № 6, с. 67—77.
14. Van Rooij J.G. Laboratory experiments and devices to study plasma surface interaction. — Fusion Science and Technology, 2012, vol. 61:2T, p. 266—272; doi: 10.13182/FST61-2T-266.
15. Кралькина Е.А. Индуктивный высокочастотный разряд низкого давления и возможности оптимизации источников плазмы на его основе. — УФН, 2008, т. 178, № 5, с. 519—540; doi: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0178.200805f.0519>.
16. Shinohara S. Helicon high-density plasma sources: physics and applications. — Advances in Physics, X, 3:1, 1420424; doi: 10.1080/23746149.2017.1420424.
17. Bowers R., Legendy C., Rosw F. — Phys. Rev. Lett., 1961, vol. 7, p. 339.
18. Harding G.N., Thonemann P.C. — Proc. Phys. Soc., 1965, vol. 85, p. 317.
19. Boswell R.W. — Phys. Lett., 1970, vol. 33A, p. 457.

20. **Zhu P., Boswell R.W.** — Phys. Rev. Lett., 1989, vol. 63, p. 2805.
21. **Chen F.F.** — Plasma Phys. Control. Fusion, 1991, vol. 33, p. 339.
22. http://www.hfpower.ru/Product_rus.htm.
23. <https://www.advancedenergy.com/globalassets/resources-root/data-sheets/navio-product-data-sheet.pdf>.
24. https://en.wikipedia.org/wiki/Smith_chart.
25. **Navarro-Cavallé J. et al.** Experimental characterization of a 1 kW helicon plasma thruster — Vacuum, 2018, vol. 149, p. 69—73.
26. **Pandey A. et al.** Conceptual design of a permanent ring magnet based helicon plasma source module intended to be used in a large size fusion grade ion source. — Fusion Engineering and Design, 2016, vol. 103, p. 1—7.
27. **Мордик С.Н. и др.** Геликоновые генераторы плазмы для аналитических приложений. — ВАНТ. Сер. Плазменная электроника и новые методы ускорения, 2008, № 4, с. 147—149.
28. **Yoshitaka M. et al.** Focusing magnetic field contribution for helicon plasma on Mini-RFTF. — Thin Solid Films, 2006, vol. 506—507, p. 583—587; <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.08.063>.



Дмитрий Ильич Черкез,
н.с. ККФХТ; НИЦ «Курчатовский институт»,
123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1,
Россия
cherkez_DI@nrcki.ru



Николай Павлович Бобырь,
н.с. ККФХТ; НИЦ «Курчатовский институт»,
123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Bobyr_NP@nrcki.ru



Александр Викторович Спицын,
к.ф.-м.н., начальник лаборатории; НИЦ «Курчатовский институт»,
123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Spitsyn_AV@nrcki.ru



Сергей Станиславович Ананьев,
в.н.с., к.ф.-м.н., лауреат премий Правительства РФ, им.
И.В. Курчатова и А.П. Александрова; НИЦ «Курчатовский институт»,
123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Ananyev_SS@nrcki.ru

Статья поступила в редакцию 28 декабря 2020 г.

После доработки 15 июня 2020 г.

Принята к публикации 5 августа 2020 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2020, т. 43, вып. 3, с. 101—110.