

*На правах рукописи*



**КУЗЬМИН Евгений Игоревич**

**ГЕНЕРАЦИЯ ПЛАЗМЫ ГЕЛИКОННОГО  
ВЧ РАЗРЯДА В НЕОДНОРОДНОМ  
МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

1.3.9. Физика плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ  
РУКОВОДИТЕЛЬ — кандидат физико-математических наук  
Шиховцев Игорь Владимирович

#### ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Бурдовицин Виктор  
Алексеевич доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», профессор кафедры физики

Изотов Иван Владимирович кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», заведующий лабораторией

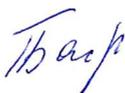
ВЕДУЩАЯ  
ОРГАНИЗАЦИЯ: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится « 9 » декабря 2022 г. в « 16 » часов « 30 » минут на заседании диссертационного совета 24.1.162.02 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯФ СО РАН и на сайте [https://inp.nsk.su/images/Kuzmin\\_disser.pdf](https://inp.nsk.su/images/Kuzmin_disser.pdf).

Автореферат разослан « 27 » октября 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук



П. А. Багрянский

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время в физике плазмы с каждым годом увеличивается приоритет задач, связанных с термоядерным синтезом. В термоядерных источниках плазмы для достижения условий загорания термоядерной реакции плазма должна иметь большую плотность и температуру [1]. Взаимодействие такой плазмы с поверхностью вакуумной камеры и дивертора, особенно в процессе срыва, предъявляет жесткие требования к материалу первой стенки. Симуляцию таких процессов можно проводить на более дешевых по сравнению с токамаками линейных плазменных установках, которые могут работать в стационарном режиме, и обеспечивают необходимые параметры плазмы [2].

Высокочастотные (ВЧ) плазменные источники, как альтернатива дуговым источникам для материаловедческих исследований, становятся все более востребованными. Безэлектродные ВЧ генераторы плазмы позволяют работать в стационарном режиме, при этом плазма содержит малую долю нежелательных примесей. Широко распространенные индуктивные ВЧ источники плазмы имеют внешние ВЧ антенны служащие для генерации электрических и магнитных полей индукционного разряда. Если поместить индукционный источник во внешнее магнитное поле ( $B_0$ ), в плазме начинают распространяться низкочастотные продольные электромагнитные волны с частотой  $\omega \ll \omega_p$ . Эти волны в радиально ограниченной плазме называются геликонными, а в свободном пространстве вистлерами. В результате поглощение мощности становится возможным во всем объеме плазмы, что увеличивает эффективность разряда [3].

**Степень разработанности темы исследования.** Временной период между 60-ми и 90-ми годами 20 века характеризуется исследованиями геликонного разряда в однородном магнитном поле, однако ранние эксперименты, проведенные Вирко [5], показали существенный рост плотности плазмы в источниках с неоднородным магнитным полем в областях под и вне антенны. Позднее группа Мори на установке Mini-RFTF достигла увеличения плотности плазмы в несколько раз, используя конфигурацию со сходящимся полем вне антенны, наблюдая максимумы плотности как выше, так и ниже частоты нижнегибридного резонанса [6]. Стоит отметить работу К. П. Шамрая, посвященную теории геликонного разряда в неоднородном магнитном поле, в которой он в качестве причины наблюдаемого роста плотности плазмы в неоднородном поле рассматривает взаимодействие геликонных и электростатических потенциальных волн Трайвеллписа-Гоулда [3].

**Главной целью** диссертации является разработка эффективного высокочастотного геликонного плазменного источника и исследование различных режимов генерации плазмы в неоднородном магнитном поле. Для достижения поставленной цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Создание и исследование геликонного ВЧ источника плазмы с градиентом магнитного поля и пробочной конфигурацией силовых линий в области ВЧ антенны.
2. Увеличение эффективности генерации плазмы и увеличение мощности, потребляемой разрядом, в результате оптимального согласования импеданса плазмы с нагрузкой ВЧ генератора. Для этого в работе предложено использование П-схемы согласования и проведены эксперименты по определению коэффициента ввода мощности в разряд.
3. Изучение влияния внешних параметров, таких как вводимая в разряд мощность, величина магнитного поля, давление нейтрального газа и форма ВЧ антенны, на плотность плазмы и электронную температуру с целью увеличения эффективности источника.
4. Изучение влияния на генерацию плазмы различных конфигураций магнитного поля, таких как пробочная конфигурация с различным пробочным отношением, направлением тока в катушках и углом наклона силовых линий.

**Научная новизна исследования заключается в следующем:** в данной работе выполнено исследование геликонного разряда в неоднородном магнитном поле под антенной при высоких ВЧ мощностях. Эксперименты проводились на линейной плазменной установке с геликонным источником плазмы [4]. Данный источник имеет ряд важных технических особенностей. Геометрия магнитных полей за счет ослабления поля в области ВЧ антенны повторяет конфигурацию пробкотрона, что улучшает удержание плазмы, а также эффективную передачу энергии ВЧ полей вглубь плазмы [5]. Магнитное поле имеет минимум в области антенны с пробочным отношением  $\sim 2$ .

**Основная теоретическая и практическая значимость** диссертационной работы состоит в том, что получены новые знания о генерации плазмы в ВЧ источниках геликонного типа. Обнаружено существенное увеличение на порядок плотности плазмы при использовании азимутально несимметричной антенны в пробочной конфигурации внешнего магнитного поля. При проведении экспериментов по увеличению эффективности согласования плазменного импеданса с нагрузкой генератора зафиксирован рост коэффициента ввода мощности в плазму при увеличении мощности. Разработана СВЧ методика диагностики плотности плазмы, ранее не упоминавшаяся в работах по геликонному разряду. Для высоких значений вводимой в плазму мощности показано, что помимо величины поля, важную роль в генерации плазмы играет наклон силовых линий, с увеличением которого значительно растет плотность плазмы.

Исследования, проведенные в работе, использованы для реализации международного контракта совместно с Forschungszentrum Jülich GmbH (Германия) по разработке геликонного источника плазмы для материаловедческих исследований (2020 г.). Полученные знания использованы при разработке концептуального дизайна стационарного источника плазмы для

международного проекта ALIANCE [10] совместно с Институтом безопасности ядерной энергии Китайской академии наук (Хэфэй, Китай, 2021 г.).

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. В геликонном источнике с неоднородным магнитным полем пробочной конфигурации силовых линий оптимизирована антенна. Геликонная полуволновая антенна по плотности плазмы в  $\sim 10$  раз эффективнее по сравнению с азимутально-симметричными антеннами.
2. В геликонном источнике с пробочной конфигурацией магнитного поля продемонстрирована высокая эффективность генерации плазмы с плотностью  $\sim 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  при мощности в разряде  $\sim 15 \text{ кВт}$ .
3. В геликонном источнике с полуволновой антенной при повышении вводимой в разряд мощности до  $15 \text{ кВт}$  формируется резкое увеличение плотности плазмы на оси источника при величине магнитного поля в диапазоне  $120\text{--}140 \text{ Гс}$ .
4. Плотность плазмы геликонного источника с пробочной конфигурацией обладает сильной зависимостью от градиента магнитного поля в области ВЧ антенны. Зафиксирован рост плотности плазмы в 2 раза при использовании расходящегося поля по сравнению с «классической» пробкотронной конфигурацией источника.

**Степень достоверности и апробация диссертации.** Достоверность полученных результатов подтверждена стабильными неоднократными экспериментами по измерению параметров плазмы, продемонстрировавшими повторяемость полученных результатов, также достоверность подтверждается теоретическими оценками и совпадением результатов работы с представленными в литературных источниках, упомянутых в диссертации.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Studies of the Helicon Plasma Source with Inhomogeneous Magnetic Field / I. V. Shikhvotsev, V. I. Davydenko, A.A.Ivanov [et al.]. — Текст : электронный // AIP Conference Proceedings (Novosibirsk, Russia, August 2016). — 2016. — Vol. 1771. — P. 070006-1–070006-4. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.4964230>. – Дата публикации: 11.10.2016. — [7]
2. Optimization of power matching and transfer in the helicon plasma discharge / E. I. Kuzmin, I. D. Maslakov, A. V. Chesnokov, I. V. Shikhvotsev. — Текст : электронный // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 2055(1). — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2055/1/012010>. – Дата публикации: 27.10.2021. — [8]
3. Kuzmin E. I. High-Density Helicon Plasma Source for Linear Plasma Generators / E. I. Kuzmin, I. V. Shikhvotsev. — Текст : электронный // Plasma Physics Reports — 2021. — Vol. 47(6). — P. 526-535. — URL:

<https://link.springer.com/article/10.1134/S1063780X21060118> – Дата публикации: 17.06.2021/ — [9]

4. Conceptual design of the ALIANCE-T mirror experiment / D. Yakovlev, Z. Chen, P. Bagryansky [et al.]. — Текст : электронный // Nuclear Fusion. — 2022.— Vol. 62. — No. 7. — URL: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac5224>. — Дата публикации: 2.05.2022. — [10]

Основные положения диссертации были представлены на российских и международных конференциях:

1. 11<sup>th</sup> International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement / Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russian Federation. — 8–12 августа 2016 г.
2. 7<sup>th</sup> International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion (PMIF) / Scripps Seaside Forum in La Jolla, California. — October 22-25, 2019.
3. 4<sup>th</sup> International Conference on Fusion-Fission sub-critical systems for waste management and safety / Moscow, Russia. — 25—27 ноября, 2020 г.
4. XLVIII Международная звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу / Звенигород, Россия. — 2021 г.

Большая часть результатов диссертации вошла в подготовленную научно-квалификационную работу аспиранта [11] и неоднократно обсуждалась на институтских семинарах. Исследования поддержаны персональным грантом Российского фонда фундаментальных исследований (Договор № 19-32-90117, 2019–2021 гг.).

**Личный вклад** автора в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим. При участии автора разработаны и внедрены диагностики по измерению электронной температуры и плотности плазмы. Под руководством автора проведены все эксперименты, представленные в диссертации, предложена идея по варьированию тока отдельных катушек. При активном участии автора введен в эксплуатацию и согласован генератор мощности, обеспечивающий генерацию плазмы. В результате работы автора оптимизирована генерация плазмы, увеличены показатели плотности плазмы и достигнут стабильный режим геликонного ВЧ разряда в источнике, позволяющий проведение материаловедческих экспериментов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Диссертация содержит 93 страницы, 58 рисунков и библиографический список из 110 работ.

## Содержание работы

**Во введении** приведено краткое описание современных исследований, посвященных разработке геликонных ВЧ источников с неоднородным

магнитным полем. Сформулированы главные цели и задачи работы, дана оценка актуальности, новизны, практической и теоретической значимости работы.

**В первой главе** описана история развития первых исследований плазмы геликонного разряда. Представлены результаты первых экспериментов с геликонным источником плазмы, проведенных Р.В. Босвеллом в 1960-х годах [14]. При мощности 600 Вт, давлении газа 1.5 мТорр и частоте возбуждающего генератора 8 МГц Босвеллу удалось получить плотность плазмы  $1.4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$  в случае отсутствия внешнего поля и  $3.8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  при внешнем поле 750 Гс. Данный результат мотивировал многих исследователей начать эксперименты с геликонными источниками, поскольку другие плазменные источники требовали значительно больших затрат энергии для достижения таких плотностей плазмы. В соавторстве с другими исследователями Босвелл позднее изучил влияние магнитного поля, давления газа, величины плазменной камеры и ВЧ мощности на параметры плазмы.

Далее в главе перечислены основные теоретические работы по физике геликонного разряда, наиболее полной стоит считать работу Клозенберга совместно с МакНамара и Тонеманном [13], в которой было показано решение дисперсионного уравнения продольных электромагнитных волн для случая замагниченной радиально ограниченной бесстолкновительной плазмы в приближении  $m_e \rightarrow 0$  для случая проводящей и непроводящей стенок. В главе описаны теоретические и экспериментальные работы по плазме геликонного разряда в неоднородном поле [3]. Рассмотрены основные результаты и перспективы направления.

В конце главы описаны основные линейные плазменные установки с геликонным источником плазмы, перечислены получаемые плотности плазмы, электронная температура и поперечный размер, характерное магнитное поле и входная ВЧ мощность.

**Во второй главе** приведен краткий вывод дисперсионного уравнения для случая холодной плазмы в продольном внешнем магнитном поле, рассмотрено его решение с учетом конечной электронной массы. Корни этого уравнения соответствуют слабо затухающим геликонным волнам или Н-волнам и сильно затухающим электростатическим волнам Трайвелписа-Гоулда. С помощью дисперсионного уравнения получены условия распространения геликонных и ТГ-волн в  $(n_e, B_0)$ -координатах, которые далее использованы для интерпретации экспериментальных данных. Для геликонной плазмы при учете столкновений показано условие на критическое магнитное поле, при котором ТГ-волны затухают в плазме [3]. Также в работе произведена оценка баланса мощности, необходимой для поддержания плазмы с конкретными значениями плотности и электронной температуры.

**В третьей главе** приведено описание экспериментальной установки, перечислены основные параметры и характеристики, также подробно описаны методы применяемых диагностик плазмы.

В ИЯФ СО РАН разработана экспериментальная установка с геликонным ВЧ источником [4], на которой ведутся эксперименты по получению и исследованию плазмы ВЧ разряда во внешнем магнитном поле. Схема источника показана на рисунке 1(а). Магнитное поле установки создается пятью катушками (рисунок 1 (б)). Максимально допустимый ток в импульсном режиме – 50 А. Магнитное поле имеет пробочную конфигурацию (пробочное отношение  $\sim 2$ ) с сильным полем на краю разрядной камеры (максимальное до 1.5 кГс) и слабо расходящимся полем под ВЧ антенной. Водород в камеру напускался в непрерывном режиме в течение импульса. При измерениях везде указано давление в камере в момент установления квазистационарного разряда.

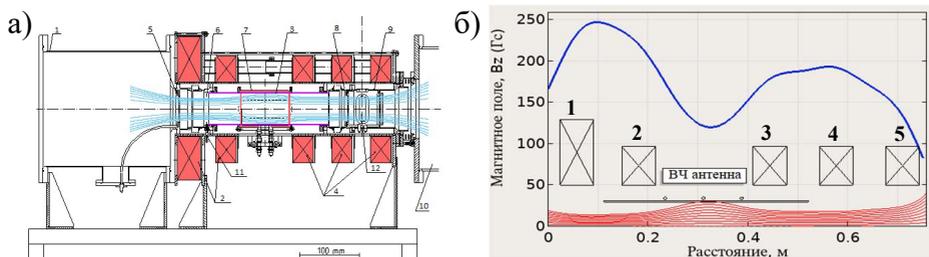


Рисунок 1 — (а) Схема геликонного источника плазмы: 1 — расширительный объем; 2, 4 — катушки магнитного поля; 3 — кварцевая камера (длина 400 мм, внешний диаметр 108 мм, толщина стенки 2.5 мм); 5, 8 — лимитеры; 6 — импульсный клапан напуска газа; 7 — геликонная антенна; 9 — диагностическая камера; 10 — вакуумный объем стенда; 11 — поджиг; 12 — ось ввода ленгмюровского зонда (расстояние до центра антенны 326 мм). (б) Распределение продольного магнитного поля и магнитных силовых линий при токе в магнитных катушках 5 А

В эксперименте были исследованы ВЧ-антенны, изображенные на рисунке 2: NAGOYA TYPE III (NIII) и геликонная полуволновая (H-H) антенны с  $m=\pm 1$  симметрией, а также витковая антенна с  $m=0$  симметрией, поскольку данный тип антенн широко распространен в экспериментальной физике индукционного разряда, и существуют весьма успешные результаты ( $n_e \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ) по использованию витковой антенны на установках с магнитным полем и низкой ВЧ-мощностью (до 1 кВт) [5].

Для проведения исследования влияния ВЧ мощности на геликонный разряд было выполнено согласование промышленного генератора COMDELL CX25000-S мощностью до 25 кВт. Для этого были разработаны и использованы Г- и П-схемы согласования (рисунок 3). Для оценки доли мощности, поглощенной плазмой, были определены плазменная нагрузка и коэффициент ввода мощности. Для этого был измерен ток в ВЧ антенны поясом Роговского, и использована трансформаторная модель плазмы.



Рисунок 2 — Типы использованных ВЧ антенн: витковая ( $d_a=3.6$  см,  $m=0$ ); НПИ ( $d_a=16$  см,  $m=\pm 1$ ); Н-Н ( $d_a=15$  см,  $m=\pm 1$ ); диаметр медной трубки  $d=6$  мм

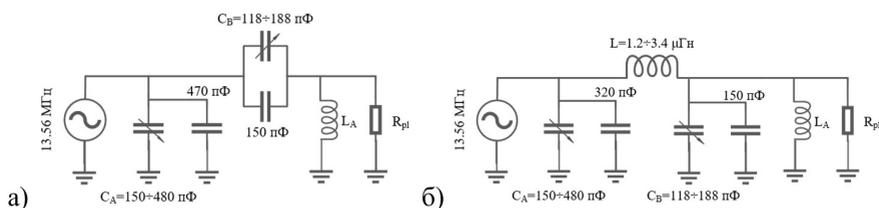


Рисунок 3 — а) Г-схема согласования; б) П-схема согласования.  $C_A$ ,  $C_B$  – подстроечные конденсаторы,  $L_A$  – индуктивность антенны,  $R_{pl}$  – нагрузка плазмы

Для измерения плотности и электронной температуры плазмы в 326 мм от центра ВЧ-антенны расположен тройной ленгмюровский зонд на вертикальной подвижке. Гальваническая развязка между зондом и измерительной схемой реализована с помощью оптронных преобразователей с малой емкостью связи между передатчиком и приемником, что позволяет избежать влияния емкостных помех, вызванных колебаниями потенциала плазмы.

Для калибровки тройного ленгмюровского зонда была разработана СВЧ диагностика плотности плазмы по отсечке с использованием фторопластовых линз. Метод основан на анализе СВЧ волн, проходящих через плазму. Как известно, при плотности электронов выше критической, частота зондирующей волны ниже плазменной, при этом плазма становится непрозрачной для СВЧ волны, поэтому данный метод измерения плотности плазмы зондирующей СВЧ волной также называют методом «отсечки». Схема диагностики показана на рисунке 4. Она состоит из генератора СВЧ (рабочая частота 18–53 ГГц), соединенного волноводом с фторопластовой линзой-источником, фторопластовой линзой-двух концентрично расположенных сферических линз (радиус кривизны линз 65 мм, фокус  $\sim 140$  мм), направленных поперек кварцевой камеры).

**В четвертой главе** описаны основные экспериментальные результаты работы. В экспериментах была исследована зависимость плотности и электронной температуры плазмы на оси от вводимой в разряд мощности.

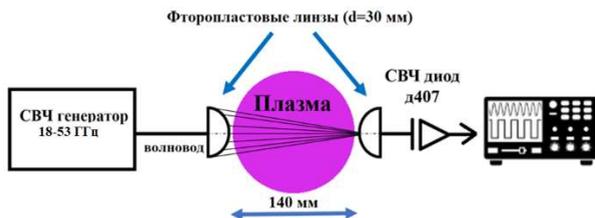


Рисунок 4 — Схема СВЧ диагностики плотности плазмы методом “отсечки”. Расстояние между линзами 200 мм, диаметр линзы 30 мм

Плотность плазмы равномерно увеличивается с ростом мощности для витковой антенны (рисунок 5). При 15 кВт достигается плотность плазмы  $4.4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ . НИИ антенна показывает более высокую эффективность ионизации почти на порядок:  $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  при 15 кВт. В экспериментах с полуволновой геликонной антенной удалось получить самые высокие значения плотности:  $5.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  при 15 кВт. Электронная температура в случае геликонной антенны несколько ниже, чем для витковой и НИИ антенн, и составляет 7–10 эВ.

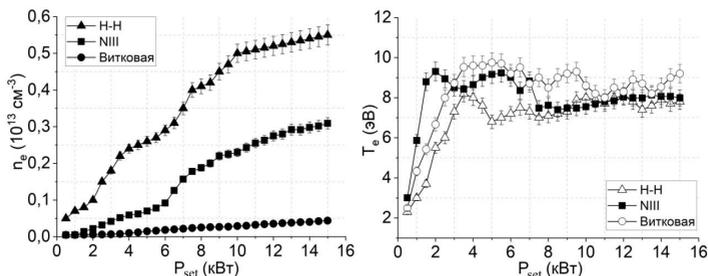


Рисунок 5 — Зависимость плотности плазмы и электронной температуры от ВЧ мощности для витковой (магнитное поле 600 Гс, давление газа 25 мТорр), НИИ (магнитное поле 240 Гс, давление газа 24 мТорр) и Н-Н (магнитное поле 180 Гс, давление газа 18 мТорр) антенн

Одной из целей данной работы было исследование влияния величины магнитного поля на генерацию разряда. В ходе эксперимента были измерены зависимости плотности и электронной температуры от тока в катушках при различной мощности ВЧ-генератора. В случае витковой антенны не наблюдается ярко выраженных максимумов плотности по магнитному полю, плотность плазмы равномерно, без скачков, достигая в максимуме  $4.4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$  при магнитном поле 580 Гс и мощности 15 кВт. НИИ антенна позволяет получить более высокую плотность плазмы по сравнению с витковой антенной. Для всех значений мощности оптимальное магнитное поле совпадает и равно 240 Гс. В экспериментах с Н-Н антенной наблюдается резкое увеличение плотности при оптимальных значениях поля (рисунок 6). При увеличении подводимой мощности наблюдается изменение оптимальных значений  $B_z$ : максимум плотности  $0.4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  был получен при 205 Гс для 5 кВт, для мощности 15 кВт

оптимальное поле равно 140 Гс, а достигаемая плотность  $1.2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . При  $B_z > 250$  Гс плотность плазмы постепенно снижается.

С помощью подвижного тройного зонда были измерены радиальные распределения плотности и электронной температуры плазмы. Для витковой и НШ антенны распределение плотности имеет колоколообразный профиль с максимумом на оси и высокой однородностью на диаметре 3—4 см. Радиальные профили плотности плазмы и электронной температуры для геликонной антенны обнаруживают ряд особенностей, не наблюдавшихся в экспериментах с витковой и НШ антенной. Форма радиального профиля плотности становится более пикированной с ростом ВЧ-мощности и при 15 кВт падает в два раза на расстоянии 1 см от оси (рисунок 7). В целом разряд характеризуется более низкой температурой плазмы по сравнению с витковой и НШ антеннами.

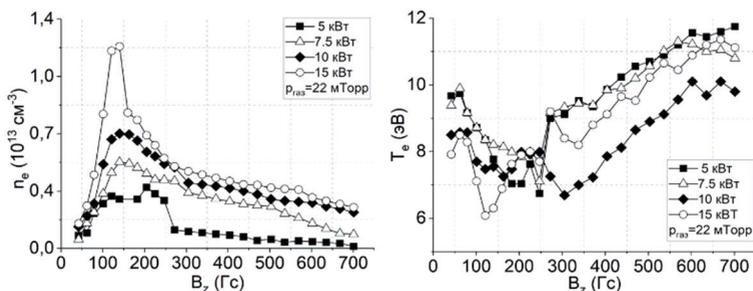


Рисунок 6 — Плотность плазмы и электронная температура при различном магнитном поле в области Н-Н антенны

Для резонансных значений магнитного поля были измерены зависимости плотности и электронной температуры от давления нейтрального газа в плазменной камере в диапазоне от 10 до 47 мТорр. Распределение плотности по давлению нейтрального газа для витковой антенны имеет максимальные значения при 20–25 мТорр. Распределение плотности плазмы НШ по давлению в камере имеет схожие значения оптимального давления газа — около 20—30 мТорр, в частности, 21 мТорр для 15 кВт ( $n_e = 3.6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ). Н-Н антенна характеризуется повышенным значением оптимального давления по сравнению с витковой и НШ антеннами. С ростом мощности оптимальное давление газа для геликонной антенны увеличивается: при 15 кВт оптимальное давление составляет 42 мТорр, ( $n_e = 2.05 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ).

В ходе работы было произведено согласование импеданса плазмы с нагрузкой генератора с помощью двух разных схем согласования, и, как следствие, увеличено поглощение мощности. При использовании П-схемы было получено согласование с уровнем прошедшей мощности около 95% от входной мощности и стабильным режимом поглощения при 25 кВт. П-схема имеет низкую добротность ( $\sim 2$ ), позволяя проводить согласование в широком диапазоне параметров (таких как магнитное поле и давление нейтрального газа) без дополнительной подстройки согласующих элементов.

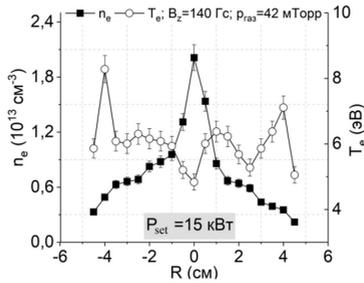


Рисунок 7 — Радиальные профили плотности плазмы и электронной температуры для Н-Н антенны

В эксперименте получена плазма с плотностью  $\sim 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  при мощности 20÷25 кВт с электронной температурой около 10 эВ в области оптимального магнитного поля (150÷200 Гс). Путем измерения тока ВЧ антенны поясом Роговского была измерена плазменная нагрузка плазмы. Активное сопротивление антенны  $R_{ant} = 0.73 \pm 0.05 \text{ Ом}$ , реактивное сопротивление  $X_{ant} = 53.5 \pm 1.8 \text{ Ом}$ . Максимальная нагрузка наблюдается для 25 кВт (6.2 Ом), а самая низкая - для 10 и 20 кВт (4 Ом). С помощью измерений плазменной нагрузки был определен коэффициента ввода мощности в разряд (рисунок 8), величина которого  $85 \pm 5\%$  при оптимальном магнитном поле. Остаток мощности рассеивается в виде тепловых потерь в передающей линии, согласующем контуре и ВЧ антенне.

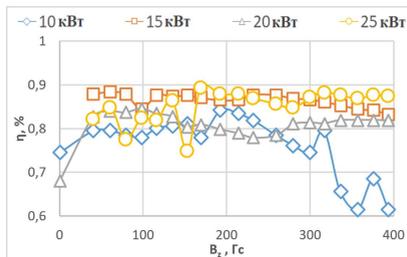


Рисунок 8 — Зависимость коэффициента ввода мощности от магнитного поля. Давление газа 20 мТорр

Далее в экспериментах ток в катушках варьировался отдельно, были исследованы конфигурации с расходящимся полем и разнонаправленными токами катушек, для различных конфигураций была измерена зависимость плотности и электронной температуры от величины поля с помощью тройного зонда, а также СВЧ диагностики, при этом мощность и давление газа были одинаковыми во всех измерениях. Величина тока катушек обозначена символом «Y» для катушек с фиксированным током в эксперименте, а символом «X» с варьируемым. Были изучены три конфигурации магнитного поля с разной геометрией: пробочная конфигурация с разным пробочным отношением (Y X-X Y-Y), конфигурация с полем, сходящимся в сторону зонда (X-X-X Y-Y) и конфигурация с полем, расходящимся к зонду (Y-Y X-X-X).

Для пробочной конфигурации (Y-Y X-X-X) зависимость плотности плазмы от тока катушек 2, 3, измеренные зондом (а) и СВЧ диагностикой (б), показана на рисунке 9. Максимальная плотность плазмы ( $10^{13} \text{ см}^{-3}$ ) достигается для конфигурации 3.4А–4А–4А–3.4А–3.4А. Электронная температура для ненулевого тока катушек 1, 4, 5 меняется в диапазоне 10–16 эВ для  $I_{2,3}>0$ , при  $I_{2,3}<0$  наблюдаются максимумы с электронной температурой 18.7 эВ, 15.8 эВ и 16.1 эВ для тока 1, 4, 5 катушек 3.4 А, 8.5 А и 15.5 А соответственно (рисунок 10(а)). На рисунке 10(б) показаны конфигурации магнитного поля с током катушек 2, 3, соответствующим максимальной плотности плазмы, измеренной тройным зондом, для кривых на рисунке 9(а).

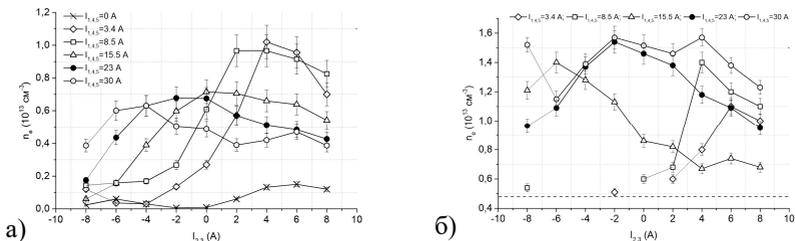


Рисунок 9 — Зависимость плотности плазмы от тока в катушках для конфигурации Y X-X Y-Y, измеренная (а) тройным зондом и (б) СВЧ диагностикой (пунктирной линией показана минимальная детектируемая плотность плазмы, соответствующая частоте отсечки 18 ГГц);  $P_{\text{вх}}=15 \text{ кВт}$ ,  $P_{\text{газ}}=22 \text{ мТорр}$

В случае конфигурации катушек X-X-X Y-Y ток катушек 1, 2, 3 варьировался от -7 до 7 А при фиксированном токе катушек 4, 5 (5, 15, 23, 30 А), таким образом, в области антенны создавалось сильно неоднородное расходящееся поле с разным наклоном силовых линий и сильным полем в области тройного зонда. При повышении тока катушек 4, 5 оптимальный ток варьируемых катушек уменьшается, достигая нулевого значения для конфигураций X-X-X-23А–23А и X-X-X-30А–30А с полем под антенной 78 Гс и 100 Гс и плотностью  $2.3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и  $2.6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  соответственно (рисунок 11(а)).

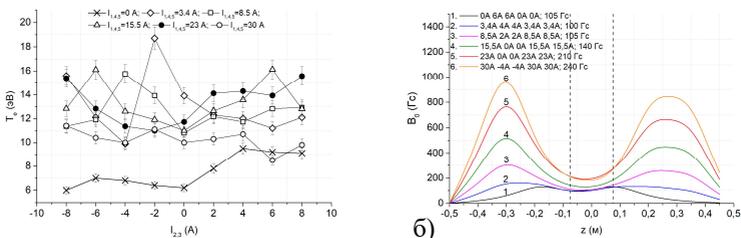


Рисунок 10 — (а) Зависимость электронной температуры от тока в катушках для конфигурации Y X-X Y-Y;  $P_{\text{вх}}=15 \text{ кВт}$ ,  $P_{\text{газ}}=22 \text{ мТорр}$ . (б) Распределение  $B_z$  для конфигурации катушек Y X-X Y-Y (пунктиром обозначены края ВЧ антенны)

Электронная температура (рисунок 12 (а)) в области оптимальной плотности колеблется в диапазоне 9-12 эВ, для тока 4 и 5 катушек 30 А наблюдается резкий пик температуры (19.8 эВ) для  $I_{1,2,3}=4$  А, при понижении тока  $T_e$  растет для всех распределений. Измерения СВЧ диагностикой для  $I_{4,5}=15$  А, 23 А, 30 А коррелируют с измерениями зонда, но с меньшей плотностью плазмы (рисунок 11(б)). Оптимальные по плотности плазмы конфигурации магнитного поля показаны на рисунке 12 (б). Поскольку максимальная достигнутая для данной геометрии силовых линий плотность соответствует магнитному полю 100 Гс (конфигурация 0А—0А—0А—30А—30А), можно сделать вывод о том, что градиент магнитного поля играет существенную роль при генерации геликонного разряда.

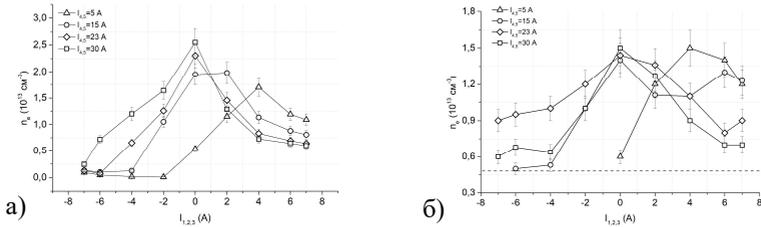


Рисунок 11 — Зависимость плотности плазмы от тока в катушках для конфигурации X–X–X Y–Y, измеренная (а) тройным зондом и (б) СВЧ диагностикой;  $P_{вх}=15$  кВт,  $P_{газ}=22$  мТорр

Далее, для конфигурации Y–Y X–X–X ток катушек 3, 4, 5 менялся в диапазоне от -8 до 8 А для тока 1 и 2 катушек 5, 15, 23, 30 А. Магнитное поле имеет максимум в области расширителя с расходящимися силовыми линиями в области антенны. Максимальная плотность ( $1.8 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>) достигается для конфигурации 23А–23А–4А–4А–4А (рисунок 13(а)). Для данной конфигурации зафиксирована низкая температура электронов ~2–4 эВ. Температура растет при увеличении тока катушек в области тройного зонда, достигая 3–6 эВ для различного тока 1,2 катушек. При нулевом токе 3, 4, 5 катушек наблюдается минимум температуры, зафиксированный в работе (1.5 эВ для конфигурации 5А–5А–0А–0А–0А). На рисунке 13(б) показаны магнитные конфигурации с распределением тока в катушках, соответствующего максимальной плотности плазмы.

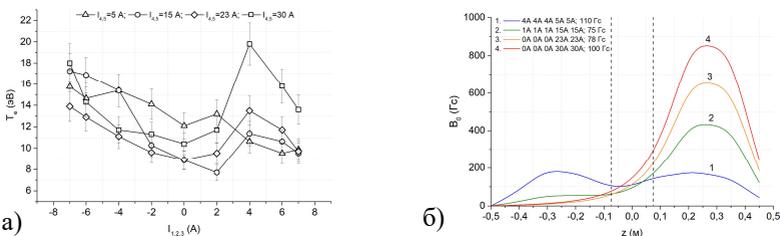


Рисунок 12 — (а) Зависимость электронной температуры от тока в катушках для конфигурации X–X–X Y–Y;  $P_{вх}=15$  кВт,  $P_{газ}=22$  мТорр. (б) Распределение  $B_z$  для конфигурации катушек X–X–X Y–Y

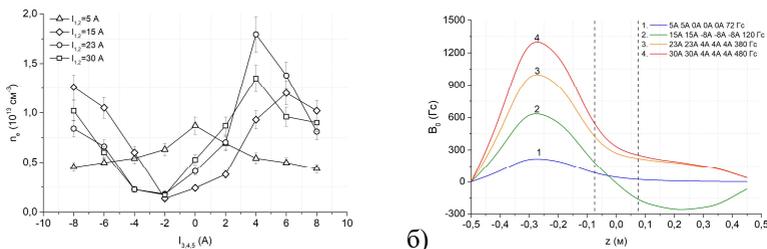


Рисунок 13 — (а) Зависимость плотности плазмы от тока в катушках для конфигурации Y–Y X–X–X, измеренная тройным зондом;  $P_{\text{вх}}=15 \text{ кВт}$ ,  $P_{\text{газ}}=22 \text{ мТорр}$ . (б) Распределение внешнего магнитного поля для конфигурации катушек Y–Y X–X–X

**В заключении** приведены основные результаты, опубликованные в работах [7],[8],[9],[10]:

1. В исследовании проведены эксперименты по оптимизации генерации плазмы в геликонном источнике с пробочной конфигурацией магнитного поля:

- В работе были испытаны различные типы ВЧ антенн для возбуждения плазмы: витковая антенна ( $m=0$ ), Nagoya Type III ( $m=\pm 1$ ) антенна и полуволновая геликонная антенна ( $m=\pm 1$ ). Фазированная антенна геликонного типа показывает существенно более высокую плотность плазмы ( $\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ) при равных значениях мощности по сравнению с НИИ ( $\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ) антенной и особенно с витковой ( $\sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$ ).

- Проведены эксперименты по изучению влияния давления водорода и магнитного поля на плазму. В случае слабой неоднородности  $B_0$  в области под антенной (последовательное включение катушек) для витковой антенны нет выраженной зависимости плотности плазмы по магнитному полю. Для НИИ эта зависимость более плавная, плотность падает на интервале  $\sim 500 \text{ Гс}$ , а для Н-Н антенны имеются более резкие максимумы, в особенности при  $15 \text{ кВт}$  ВЧ мощности, где плотность падает в два раза на интервале  $50\text{--}250 \text{ Гс}$ , а резонанс наблюдается в области  $150 \text{ Гс}$ .

2. Выполнены эксперименты по согласованию нагрузки ВЧ генератора и импеданса плазмы:

- Достигнут стабильный уровень согласования при мощности до  $25 \text{ кВт}$  с потерями мощности менее  $5\%$ .

- Измерена плазменная нагрузка плазмы при различных режимах генерации плазмы, ее значение меняется в диапазоне  $2\text{--}6 \text{ Ом}$ .

- Коэффициент передачи мощности, определенный при измерениях тока антенны, остается высоким ( $80\text{--}90\%$ ) в пределах оптимального по плотности плазмы магнитного поля.

3. Исследованы различные конфигурации магнитного поля источника и их влияние на генерацию плазмы.

- Показано, что для большинства конфигураций тока катушек максимальная плотность под антенной ниже на  $30\text{--}40\%$  плотности, измеренной зондом на расстоянии от антенны.

- Изучены три конфигурации магнитного поля с разной геометрией: пробочная конфигурация с разным пробочным отношением ( $Y\ X-X\ Y-Y$ ), конфигурация с полем, сходящимся в сторону зонда ( $X-X-X\ Y-Y$ ) и конфигурация с полем, расходящимся к зонду ( $Y-Y\ X-X-X$ ). Наибольшая плотность ( $2.6 \cdot 10^{13}\ \text{см}^{-3}$ ) получена для конфигурации  $X-X-X\ Y-Y$ .
- При повышении наклона силовых линий под антенной зафиксирован рост электронной температуры в среднем на 3–5 эВ по сравнению с пробочной конфигурацией.

## Список литературы

- [1] Lawson, J. D. Some Criteria for a Power Producing Thermonuclear Reactor / J. D. Lawson. — Текст: электронный // Proc. Phys. Soc. Sec. B — 1957. — Vol. 70(6). — No. 1. — URL: <https://doi.org/10.1088/0370-1301/70/1/303>.
- [2] A. Linear Plasma Device PSI-2 for Plasma-Material Interaction Studies / A. Kreter, C. Brandt, A. Huber [et al.]. — Текст: электронный // Fusion Sci. Technol. — 2015. — Vol. 68(8). — P. 8–14. — URL: <https://doi.org/10.13182/FST14-906>.
- [3] Шамрай, К. П. Теория поглощения высокочастотной мощности в геликонной плазме: 01.04.08 – «Физика плазмы»: диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / Шамрай Константин Павлович; Киевский Институт физики НАН Украины. — Киев, 2007 г. — 347 с. — Текст: непосредственный.
- [4] High efficiency helicon plasma source for PMI studies / A. Ivanov, V. I. Davydenko, I. A. Kotelnikov [et al.]. — Текст: электронный // Fusion Sci. Technol. — 2013. — Vol. 63. — P. 217-221. — URL: <https://doi.org/10.13182/FST13-A16909>.
- [5] Wave phenomena, hot electrons, and enhanced plasma production in a helicon discharge in a converging magnetic field / V. F. Virko, K. P. Shamrai, Y. V. Virko, G. S. Kirichenko. — Текст: электронный // Phys. Plasmas. — 2004. — Vol. 11. — P. 3888. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.1764830>.
- [6] High density hydrogen helicon plasma in a non-uniform magnetic field / Y. Mori, H. Nakashima, W. F. Baity [et al.]. — Текст: электронный // Plasma Sources Sci. Technol. — 2004. — Vol. 13. P. 424-435. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/0963-0252/13/3/009>.
- [7] Studies of the Helicon Plasma Source with Inhomogeneous Magnetic Field / I. V. Shikhvotsev, V. I. Davydenko, A.A.Ivanov [et al.]. — Текст: электронный // AIP Conference Proceedings (Novosibirsk, Russia, August 2016). — 2016. — Vol. 1771. — P. 070006-1–070006-4. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.4964230>. — Дата публикации: 11.10.2016.
- [8] Optimization of power matching and transfer in the helicon plasma discharge / E. I. Kuzmin, I. D. Maslakov, A. V. Chesnokov, I. V. Shikhvotsev. — Текст: электронный // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 2055(1). — URL: <https://iop>

science.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2055/1/012010. – Дата публикации: 27.10.2021.

[9] Kuzmin E. I. High-Density Helicon Plasma Source for Linear Plasma Generators / E. I. Kuzmin, I. V. Shikhovtsev. — Текст: электронный // Plasma Physics Reports — 2021. — Vol. 47(6). — P. 526. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1063780X21060118>. — Дата публикации: 17.06.2021.

[10] Conceptual design of the ALIANCE-T mirror experiment / D. Yakovlev, Z. Chen, P. Bagryansky, A. Bragin [et al.]. — Текст: электронный // Nucl. Fusion. — 2022. — Vol. 62. — P. 076017. — URL: 10.1088/1741-4326/ac5224. — Дата публикации: 2.05.2022.

[11] Кузьмин, Е. И. Разработка стационарного ВЧ источника плазмы высокой плотности: специальность 1.3.9 «Физика плазмы»: научно-квалификационная работа аспиранта / Кузьмин Евгений Игоревич; Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера. – Новосибирск, 2022. – 86 с. – Текст: непосредственный.

[12] Volume and surface rf power absorption in a helicon plasma source / K. P. Shamrai, V. B. Taranov. — Текст: электронный // Plasma Sources Sci. Technol. — 1996. — Vol. 5. — P. 474. — URL: <https://doi.org/10.1088/0963-0252/5/3/015>.

[13] The dispersion and attenuation of helicon waves in a uniform cylindrical plasma / J. P. Klozenberg, B. McNamara, P. C. Thonemann. — Текст: электронный // Fluid Mech. — 1965. — Vol. 21. part 3. — P. 545—563. — URL: <https://doi.org/10.1017/S0022112065000320>.

[14] Boswell, R. W. Plasma production using a standing helicon wave / R. W. Boswell. — Текст: электронный // Phys. Lett. A— 1970. — Vol. 33.— P. 457. — URL: [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(70\)90606-7](https://doi.org/10.1016/0375-9601(70)90606-7).

[15] Geometrical resonances of helicon waves in an axially bounded plasma / V. F. Virko, G. S. Kirichenko, K. P. Shamrai. — Текст: электронный // Plasma Sources Sci. Technol. — 2002. — Vol. 11. — P. 10–26. — URL: <https://doi.org/10.1088/0963-0252/11/1/302>.

[16] Plasma production from helicon waves / A. W. Degeling, C. O. Jung, R. W. Boswell, A. R. Ellingboe. — Текст: непосредственный // Physics of Plasmas. — 1996. — Vol. 3. — P. 2788.

КУЗЬМИН Евгений Игоревич

ГЕНЕРАЦИЯ ПЛАЗМЫ ГЕЛИКОННОГО  
ВЧ РАЗРЯДА В НЕОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 3.10.2022 г. Подписано в печать 5.10.2022 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 1.0 усл. печ.л., 0.8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 9

Обработано на РС и отпечатано

на ротапринте ИЯФ СО РАН,

*Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11*