

О возможных причинах неустойчивости геликонного разряда

А. В. Гавриков^{1,2}, Н. А. Ворона^{1,2}, С. Д. Кузьмичев^{1,2}, Г. Д. Лизякин¹ и
Р. А. Тимирханов^{1,2}

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва
125412, Россия

² Московский физико-технический институт (государственный университет),
Институтский пер., 9, Долгопрудный 141701, Россия

E-mail: antonmelnikoff@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 29 ноября 2019 г.

Аннотация. В работе проводится анализ возможных причин нестабильности горения геликонного ВЧ-разряда в аргоне. Данный тип разряда используется в качестве источника буферной плазмы при разработке технологии плазменной переработки отработавшего ядерного топлива. Можно выделить две основные причины неустойчивости разряда. Во-первых, резкая немонотонность зависимости сопротивления плазмы от ее концентрации и величины магнитного поля, приводящая к рассогласованию вводимой мощности и мощности потерь. Во-вторых, геометрия торцевых электродов, задающих электростатический потенциал в плазменном объеме, и величина этого потенциала, так как они влияют на значения вводимой мощности и мощности потерь. В результате численных расчетов было выяснено, что выбор оптимальной конструкции геликонной антенны может позволить добиться большей устойчивости разряда, за счет реализации более плавной зависимости сопротивления плазмы от концентрации. <https://doi.org/10.33849/2019202>

1. ВВЕДЕНИЕ

Геликонные источники плазмы позволяют получать однородную низкотемпературную (температура электронов несколько эВ) плазму с высокой концентрацией электронов (до 10^{13} см⁻³) в большом диапазоне условий эксперимента (частота, размеры источника, величина магнитного поля, давление буферного газа). Благодаря этому они находят свое применение в плазменных технологиях (обработка материалов, микроэлектроника, плазменная сепарация), плазменных двигателях [1–3]. В ОИВТ РАН разработана и создана экспериментальная установка для изучения возможностей применения предложенного В.П. Смирновым метода плазменной сепарации [4] для перспективных технологий по переработке отработавшего ядерного топлива и радиоактивных отходов. В основе метода лежит идея пространственного разделения потоков однозарядных ионов сепарируемых веществ в замагниченной буферной плазме с особой конфигурацией электрического поля. Использование буферной плазмы необходимо для компенсации объемного заряда ионных потоков (чтобы снять ограничение на величину ионного тока и повысить производительность метода) и создания условий для воспроизведения электрического потенциала необходимой конфигурации. Буферная плазма для реализации предложенного метода плазменной сепарации должна обладать определенными свойствами:

- Концентрация плазмы 10^{12} – 10^{13} см⁻³. При таких значениях концентрации буферная плазма, обеспечивая компенсацию объемного заряда, не будет сильно подвержена влиянию ионного потока сепарируемого вещества. Длина свободного пробега сепарируемых ионов в этих условиях сравнима с размерами объема буферной плазмы, поэтому ее присутствие не окажет сильного влияния на сепарацию;
- Энергия электронов плазмы должна быть достаточно низкой, чтобы не вызывать появление ионов сепарируемых веществ с двойным зарядом;
- Характеристики получаемой плазмы должны обеспечить воспроизведение в её объеме с характерными

размерами порядка 1 м необходимого для сепарации профиля электрического потенциала (порядка 1 кВ) и постоянного магнитного поля (индукцией магнитного поля порядка 1000–2000 Гс).

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Учитывая тот факт, что наличие магнитного поля является одним из ключевых моментов метода плазменной сепарации ОЯТ, для получения буферной плазмы была выбрана разновидность высокочастотного разряда — геликонный разряд, при котором излучение антенны, расположенной на боковой поверхности плазменного цилиндра, вводится в рабочую область поперек аксиального магнитного поля (рисунок 1).

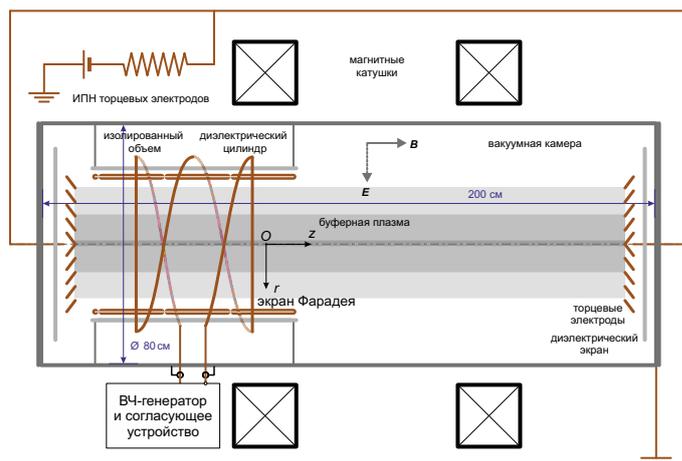


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки.

Вакуумная камера установки представляет собой металлический цилиндр с внутренним диаметром 80 см и длиной 200 см. На её торцах расположены концентрические электроды, на которые подается отрицательный потенциал. Между электродами и торцами камеры установлены диэлектрические экраны. Используемая для ВЧ-накачки плазмы геликоновая антенна ти-

па 1Н расположена в изолированном объёме, отделенном от основного объёма диэлектрическим цилиндром, пропускающим ВЧ-излучение, а также водоохлаждаемым экраном Фарадея. Активное сопротивление антенны составляет величину порядка 0.1 Ом. Рабочая частота питающего антенну ВЧ-генератора составляет около 5 МГц. Для диагностики тока в антенне используется пояс Роговского, а мощность, поглощенная нагрузкой (антенна+плазма), определяется при помощи датчиков падающей и отраженной волны (на рисунке не показаны). Катушки Гельмгольца создают магнитное поле с индукцией до 1000 Гс. Диагностика плазмы осуществляется двойным зондом Ленгмюра.

В качестве плазмообразующего газа использовался аргон, его давление составляло около 1 мТорр. Устойчивый ВЧ-разряд был получен при величинах магнитной индукции в диапазоне до 400 Гс. При вкладываемой мощности не менее 4 кВт и частоте генератора 5 МГц вблизи оси разряда устойчиво наблюдалась область голубого свечения (“blue core”) — один из признаков геликонного разряда.

Однако, при дальнейшем увеличении величины индукции магнитного поля (более 500 Гс) разряд терял устойчивость (вплоть до полного гашения). Потеря устойчивости разряда наблюдалась и при подаче потенциала на торцевые электроды. В некоторых режимах работы наблюдалась “пространственная” неустойчивость — разряд наблюдался в виде пучка ярко светящихся “голубых” трубок, число и расположение которых относительно камеры хаотично изменялось. В данной статье приведен анализ нескольких возможных причин неустойчивости геликонного разряда в условиях описанного эксперимента.

3. О ВЛИЯНИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЛАЗМЫ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ГЕЛИКОННОГО РАЗРЯДА

Разряд находится в “равновесии”, когда мощность потерь P_{loss} компенсируется вводимой (поглощаемой разрядом) мощностью P_{abs} . Для оценки величины мощности потерь P_{loss} воспользуемся соотношением, приведенным в [5] для модели разряда, использующей уравнения баланса числа частиц и мощности. С учетом упрощающих предположений, выражение для P_{loss} может быть записано следующим образом:

$$P_{loss} = n_{pl} u_B A_{eff} E_T, \quad (1)$$

где n_{pl} — концентрация плазмы в центральной части плазменного объёма, $u_B = \sqrt{\frac{T_e}{M}}$, e — элементарный заряд, T_e — температура электронов, M — масса иона, A_{eff} — эффективная площадь, через которую происходят потери частиц, E_T — потеря энергии в расчете на одну пару электрон-ион (учитывается энергия, затраченная на ионизацию и возбуждение частиц в объёме, а также кинетическая энергия, уносимая электронами и ионами на стенки камеры).

Для области разряда в форме цилиндра радиуса r_0 и длиной l при наличии продольного (соосного с осью цилиндра) магнитного поля потери будут происходить преимущественно на торцевых поверхностях, и в случае,

когда длина свободного пробега ионов плазмы λ_i сравнима с характерными размерами области разряда, эффективная площадь A_{eff} определяется выражением [5]

$$A_{eff} = 2\pi r_0^2 h_l, \quad h_l \approx 0.86 \times \left(3 + \frac{l}{2\lambda_i}\right)^{-0.5}.$$

Мощность P_{loss} для $n_{pl} = 2 \times 10^{12} \text{ см}^{-3} = 2 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$, $T_e = 2.5 \text{ эВ}$, $M = 40 \text{ г/моль}$ (аргон), $r_0 = 0.25 \text{ м}$, $l = 2 \text{ м}$, $\lambda_i = 2r_0$, $E_T = 70 \text{ эВ}$ составляет примерно 13 кВт. В такой модели мощность потерь линейно зависит от концентрации плазмы. Потери на излучение считаются пренебрежимо малыми.

При анализе энергетических характеристик высокочастотных разрядов используется величина, характеризующая способность плазмы поглощать ВЧ-мощность, — сопротивление плазмы R_{pl} . Тогда вводимую с помощью антенны в плазму мощность (поглощаемую мощность) можно определить так

$$P_{abs} = 0.5 I_{ant}^2 R_{pl}, \quad (2)$$

где I_{ant} — амплитуда тока в ВЧ-антенне. При этом считается, что «внешние» устройства (ВЧ-генератор, ВЧ-кабель, согласующее устройство) работают идеально, т.е. полностью обеспечивают условия для генерации плазмы. Эта мощность расходуется на поддержание плазмы. Так как сопротивление плазмы зависит от многих параметров плазмы, в том числе и от её концентрации $R_{pl}(n_{pl})$, то и величина вводимой мощности зависит от концентрации плазмы $P_{abs}(n_{eq})$. В равновесии

$$P_{loss}(n_{eq}) = P_{abs}(n_{eq}) \quad (3)$$

Анализ уравнений (1)–(3) позволяет, например, определить пороговое значение тока в ВЧ-антенне для получения плазмы нужной концентрации, а также установить диапазоны значений концентрации, в которых разряд устойчив [5–8]. Поскольку мощность потерь прямо пропорциональна концентрации плазмы, точки “равновесия” разряда можно определить графически по точкам пересечения графика $P_{loss}(n_{eq})$ с графиком зависимости $P_{abs}(n_{eq})$ (рисунок 2 из работы [6]). Проанализируем поведение разряда вблизи самой верхней точки пересечения графиков $P_{loss}(n_{eq})$ и $P_{abs}(n_{eq})$, где концентрация плазмы равна $n_{eq,1}$ (точка “Устойчивое равновесие”).

Пусть концентрация плазмы увеличилась: $n_1 > n_{eq,1}$. Тогда, как видно из поведения графиков, $P_{loss}(n_1) > P_{abs}(n_1)$ — мощность потерь становится больше вводимой мощности. Следовательно, концентрация начнет уменьшаться, и плазма **вернется** в исходное состояние. Пусть концентрация плазмы уменьшилась $n_2 < n_{eq,1}$. Тогда $P_{loss}(n_2) < P_{abs}(n_2)$ — вводимая мощность становится больше мощности потерь. Следовательно, концентрация начнет увеличиваться, и плазма **вернется** в исходное состояние. Таким образом, эта точка является точкой стабильного разряда.

Рассмотрим поведение плазмы вблизи точки неустойчивости (точка “Неустойчивое равновесие”). Пусть концентрация плазмы увеличилась: $n_3 > n_{eq,2}$. Тогда

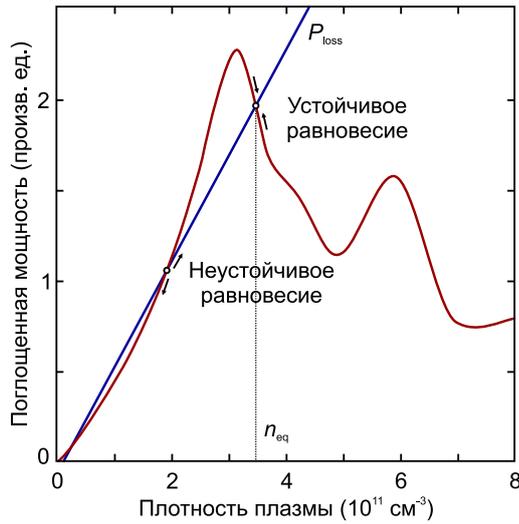


Рисунок 2. Зависимость поглощенной мощности P_{abs} от концентрации плазмы при постоянном токе антенны. Прямая линия — мощность потерь P_{loss} . Рисунок взят из статьи [6].

$P_{loss}(n_3) < P_{abs}(n_3)$ — вводимая мощность потерь становится больше мощности потерь. Следовательно, концентрация начнет увеличиваться, и плазма **не вернется** в исходное состояние. Пусть концентрация плазмы уменьшилась: $n_4 < n_{eq}$. Тогда $P_{loss}(n_4) > P_{abs}(n_4)$ — мощность потерь становится больше вводимой мощности. Следовательно, концентрация начнет уменьшаться, и плазма **не вернется** в исходное состояние. Таким образом, эта точка является точкой неустойчивого разряда.

Из вышеизложенного следует, что диапазоны значений концентрации плазмы, для которых выполняется условие $\frac{\partial P_{abs}}{\partial n_{pl}} < \frac{\partial P_{loss}}{\partial n_{pl}}$, являются диапазонами устойчивых разрядов, а неустойчивым разрядам соответствуют диапазоны, для которых $\frac{\partial P_{abs}}{\partial n_{pl}} > \frac{\partial P_{loss}}{\partial n_{pl}}$. Для заданного тока ВЧ-антенны анализ устойчивости разряда можно свести к анализу зависимости сопротивления плазмы от её концентрации [5], так как это удобно в экспериментальных приложениях. Приведенные в работах [6–8] результаты численного моделирования высокочастотного разряда, указывают на немонотонность зависимости сопротивления плазмы от её концентрации и величины магнитного поля.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЛАЗМЫ ГЕЛИКОННОГО РАЗРЯДА

С помощью программы Helic1.0. [9] нами был произведен расчет характеристик геликонного разряда с параметрами, близкими к параметрам эксперимента. По результатам численного моделирования для геликоновой антенны типа 1Н определялась зависимость сопротивления плазмы от её концентрации для разных значений магнитного поля. Основные параметры расчетов таковы: радиус плазменного объема 23 см, радиус антенны 25 см, длина антенны 40 см, расстояние между проводящими торцами 236 см, центр антенны смещен относительно центра камеры на 60 см, плазмообразующий газ — аргон, его давление составляет 3 мТорр, ча-

стота тока в антенне 5.28 МГц. При расчетах плазма считалась однородной. На рисунке 3 приведены зависимости сопротивления аргонной плазмы от её концентрации для трех значений индукции магнитного поля.

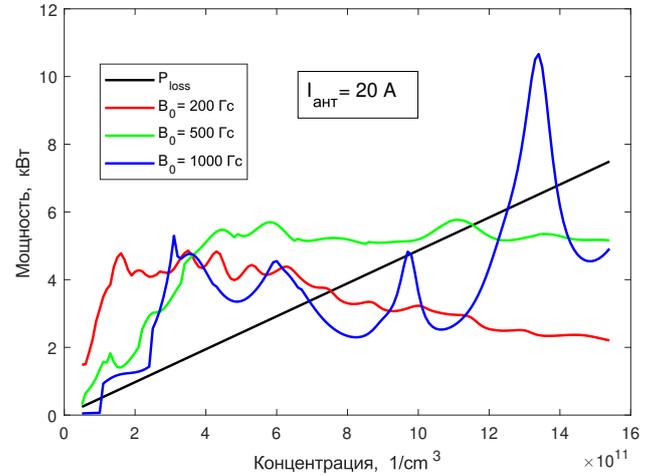


Рисунок 3. Зависимость сопротивления плазмы от ее концентрации.

Из рисунка 3 видно, что в магнитных полях 200 и 500 Гс сопротивление плазмы имеет слабо выраженные участки немонотонной зависимости от концентрации, при этом величина сопротивления изменяется незначительно. В магнитном поле в 1000 Гс отчетливо видны участки немонотонности, причем сопротивление плазмы на таких участках изменяется резко и значительно. Заметим, что зоны значений концентраций, для которых выполняется условие $(\frac{\partial R_{pl}}{\partial n_{pl}} < 0)$, соответствуют зонам стабильного разряда (для них выполняется условие $(\frac{\partial P_{abs}}{\partial n_{pl}} < \frac{\partial P_{loss}}{\partial n_{pl}})$). При этом на них приходится почти половина диапазона от 10^{12} до 2.5×10^{12} см⁻³. Зоны значений концентраций, соответствующих неустойчивому разряду, могут находиться только в диапазонах, где выполняется условие $(\frac{\partial R_{pl}}{\partial n_{pl}} > 0)$. Аналогичная ситуация имеет место для магнитных полей из диапазона 600–900 Гс (графики не приведены).

На рисунке 4 приведены графики $P_{loss}(n_{eq})$ и $P_{abs}(n_{eq})$ для разных величин магнитных полей и амплитуды тока в антенне 20 А. Из приведенных графиков видно, что в магнитных полях с индукцией 200 и 500 Гс имеется только по одной точке пересечения графиков $P_{loss}(n_{eq})$ и $P_{abs}(n_{eq})$, причем они являются точками устойчивого разряда. Для магнитного поля 1000 Гс точек пересечения становится больше, причем часть из них приходится на участки неустойчивости. При этом между точками устойчивого разряда имеет место значительный разрыв в значениях концентрации, а значит и разрыв в значениях мощности потерь. В эксперименте, где ток антенны изменяется “вручную”, это может привести к следующей ситуации. Для перехода к большей концентрации нужно увеличивать ток в антенне для компенсации возросших потерь. Но при увеличении концентрации мы приближаемся к таким её значениям, при которых разряд перестает быть устойчивым. Теоретически, чтобы “перепрыгнуть” участок неустойчивости, нужно быстро и значительно увеличить ток антен-

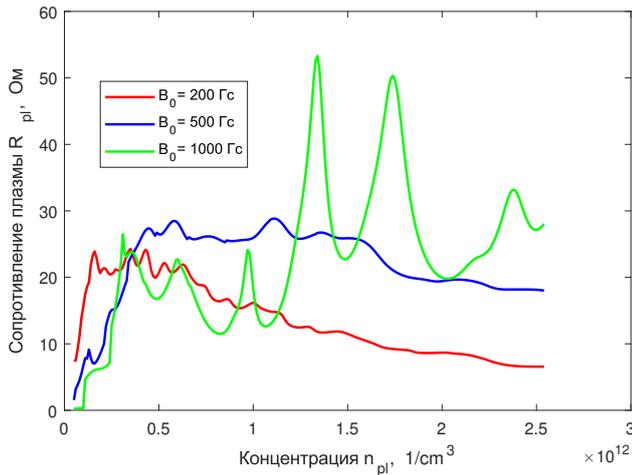


Рисунок 4. Зависимости $P_{loss}(n_{eq})$ и $P_{abs}(n_{eq})$ от концентрации для разных величин магнитных полей и амплитуды тока в антенне 20 А.

ны, однако на практике это трудновыполнимо, следовательно, разряд перейдет в неустойчивый режим.

Сопротивление плазмы, резкие и значительные изменения которого в сильном магнитном поле, возможно, являются основной причиной нестабильности разряда, определяется типом, геометрией и расположением антенны относительно камеры. Согласно [8], использование для получения геликонного разряда соленоидальной антенны вместо планарной позволило получить разряд с плавной зависимостью сопротивления плазмы от концентрации, хотя планарная антенна, с точки зрения вводимой в плазму ВЧ-мощности, является более эффективной. Это означает, что зависимость сопротивления плазмы от концентрации можно сделать более плавной, подобрав для используемой геометрии камеры, типа и давления газа оптимальную конструкцию антенны, даже за счет потери эффективности введения в плазму мощности, которую можно компенсировать увеличением тока в антенне.

5. О ВЛИЯНИИ ТОРЦОВ КАМЕРЫ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ПЛАЗМЫ

В экспериментах, результаты которых представлены в [10], исследовалось влияние граничных условий на торцах вакуумной камеры на параметры аргоновой плазмы в геликонном разряде. На одном из торцов цилиндрической камеры располагалась плоская спиральная антенна, отделенная от вакуумной камеры плоским диэлектрическим экраном, а напротив неё на некотором расстоянии внутри камеры устанавливались пластины, обладавшие разными отражательными свойствами: сплошная плоская пластина из нержавеющей стали, плоская пластина из нержавеющей стали с отверстиями диаметром 1.5 мм и расстоянием между центрами отверстий 3 мм, а также сплошная пластина из слюды. Индукция магнитного поля в области разряда составляла примерно 100 Гс. При одинаковых вводимых мощностях наибольшая концентрация плазмы была получена в экспериментах с диэлектрической пластиной, наименьшая (примерно в 4 раза меньше максимальной) — с пла-

стиной с отверстиями. По мнению авторов, полученные результаты объяснимы, если принять во внимание возможность отражения волн в разряде от торцов и допустить интерференцию этих волн, а значит появление минимумов и максимумов амплитуд волн в пространстве между торцами (стоячей волны). На это указывают полученные с помощью магнитного зонда данные о зависимости продольной компоненты ВЧ магнитного поля от положения точки измерения [10]. При таком предположении волновое поле в пространстве между торцами может быть описано так:

$$A_{\Sigma} = A_0 \exp(\alpha z + ik_z z) + R_1 A_0 \exp(-\alpha(2L - z) - ik_z z) + R_2 R_1 A_0 \exp(-\alpha(2L + z) - ik_z z) + \dots,$$

где A_0 — амплитуда волны, идущей от плоской антенны, расположенной в плоскости торца $z = 0$, α и k_z — коэффициент поглощения и аксиальное волновое число волны, L — расстояние до второго торца ($z = L$), R_1, R_2 — коэффициенты отражения волны от левого и правого торцов, соответственно. Такая модель отражения предполагает, что пространственные характеристики волны не изменяются, например, не появляются волны с другими значениями k_z , т.е. изменяется только амплитуда волны.

Учет отражения от торцов и последующей интерференции волн имеет значение, когда амплитуды интерферирующих волн имеют сравнимые значения, что возможно, если продольная длина поглощения $l_{abs} = \alpha^{-1}$ волны превышает расстояние от антенны до торца или расстояния между торцами L (продольный размер камеры). Например, в [10] удовлетворительное согласие с опытом получилось при рассмотрении интерференции четырех волн. В [5] для оценки продольной длины поглощения получены следующие выражения:

$$\text{для малых концентраций } \left(n_{pl} \ll n_0, \quad n_0 = \left(\frac{2.5}{r_0} \right)^2 \frac{B_0}{e\mu_0\omega} \right)$$

$$\alpha_{z,small}^{-1} \approx \frac{\Omega_{ce}}{k_{\perp} \nu_{\perp}}, \quad k_z \ll k_{\perp}.$$

$$\text{для больших концентраций } \left(n_{pl} \gg \left(\frac{2.5}{r_0} \right)^2 \frac{B_0}{e\mu_0\omega} \right)$$

$$\alpha_{z,large}^{-1} \approx \frac{2\Omega_{ce}}{k_z \nu_T}, \quad k_z \gg k_{\perp}$$

где $\Omega_{ce} = \frac{eB_0}{cm_e}$ — электронная циклотронная частота, B_0 — индукция магнитного поля, c — скорость света, e — элементарный электрический заряд, m_e — масса электрона, μ_0 — магнитная постоянная, $\omega = 2\pi f$, f — частота ВЧ-поля, величина k_z определяется типом антенны и для 1Н антенны по порядку величины равна $\frac{2\pi}{d_A}$ (d_A — продольный размер антенны), ν_T — частота столкновений для электрона (для условий эксперимента составляет примерно $6 \times 10^7 \text{ с}^{-1}$).

Оценка аксиальной длины поглощения для условий, реализуемых на установке, схема которой показана на рисунке 1 ($B_0 = 500$ Гс, $d_A = 0.4$ м, $r_0 = 0.23$ м,

$f = 5.28 \times 10^6$ Гц), дает следующие результаты:

для больших концентраций ($n_{pl} \gg 10^{12}$ см⁻³)

$$\alpha_{z,large}^{-1} \approx 19 \text{ м}$$

для малых концентраций ($n_{pl} \ll 10^{12}$ см⁻³)

$$\alpha_{z,small}^{-1} \approx 5.4 \text{ м}$$

Видно, что при продольных размерах установки $L \approx 2.4$ м амплитуда волны уменьшится максимум в $\exp(L\alpha_{z,large}) = \exp(\frac{2.4}{5.4}) \approx 1.6$ раза, т.е. составит примерно 0.6 от амплитуды волны, идущей во встречном направлении. Следовательно, интерференция волн должна приниматься во внимание на установке с указанными выше параметрами.

Важным фактором, способным повлиять на эффективность поглощения ВЧ-волн плазмой, является геометрия торцевых отражающих поверхностей. В экспериментах [10] отражающие поверхности можно рассматривать как плоские поверхности, при отражении от которых пространственная структура волны не изменяется. В экспериментальной установке, изображенной на рисунке 1, на торцах расположены системы конусообразных торцевых электродов (для воспроизведения в плазме необходимого профиля электрического потенциала). В этом случае пространственные характеристики волны, отраженной от такой неплоской поверхности, могут заметно отличаться от характеристик падающей волны, что может повлиять на эффективность поглощения волны плазмой, а значит и на сопротивление плазмы.

Еще одним фактором, который следует учитывать при анализе устойчивости геликонного разряда установки, показанной на рисунке 1, является наличие у кольцевых торцевых электродов потенциалов, отличных от потенциала боковой поверхности камеры.

В выражении для мощности потерь P_{loss} величина E_T определяется так [5]: $E_T = E_i + E_e + E_c$, где E_c — потери энергии при столкновениях, E_e — кинетическая энергия, уносимая на стенку электроном, E_i — кинетическая энергия, уносимая на стенку ионом. При этом $E_e = 2T_e$, а $E_i = T_i + eV_{sh}$, где V_{sh} — падение потенциала в пристеночном слое. Если все стенки камеры имеют одинаковый потенциал, например заземлены, то $eV_{sh} = T_e \ln(\frac{M_i}{2\pi m_e})^{0.5}$, где M_i и m_e — массы иона и электрона, соответственно. Для аргона $eV_{sh} \approx 4.7T_e$. Если же потенциал части поверхности стенок (электроды) можно рассматривать как катод с потенциалом V_c , то $V_{sh} \approx V_c$.

Следовательно, при подаче на электроды потенциала, превышающего $4.7\frac{T_e}{e}$, потери будут увеличиваться, точка равновесия на графиках $P_{loss}(n_{pl})$, $P_{abs}(n_{pl})$ начнет смещаться. Тогда, в зависимости от положения начальной точки равновесия, разряд может либо оказаться в новом устойчивом состоянии, либо перейти в неустойчивое состояние.

Авторам неизвестны работы, в которых бы были детально исследованы проблемы о степени влияния геометрии и потенциала торцевых электродов на устойчивость геликонного разряда. Результаты таких исследований могут оказаться важными для задач, связанных с воспроизведением в плазме электрического потенциала.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе приведен анализ возможных причин экспериментально наблюдаемой в сильных магнитных полях нестабильности геликонного разряда в аргоне. Характер изменения сопротивления плазмы при изменении её концентрации, в случае резкой немонотонной зависимости приводящий к рассогласованию между вводимой мощностью и мощностью потерь, можно сделать более плавным, подобрав оптимальную конструкцию антенны. По нашей оценке, важными факторами, способными повлиять на устойчивость геликонного разряда, являются также геометрия и потенциал торцевых электродов, однако данные вопросы изучены мало и требуют детального теоретического и экспериментального рассмотрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chen F F 2015 *Plasma Sources Science and Technology* **24** 014001
2. Shinohara S 2018 *Advances in Physics: X* **3** 1420424
3. Долголенко Д А и Муромкин Ю А 2017 *Усп. физ. наук* **187** 1071–1096
4. Смирнов В П, Самохин А А, Ворона Н А и Гавриков А В 2013 *Физика плазмы* **39** 523–533
5. Lieberman M A and Lichtenberg A J 2005 *Principles of plasma discharges and materials processing* (John Wiley & Sons)
6. Shamrai K P 1998 *Plasma Sources Science and Technology* **7** 499–511
7. Isayama S, Shinohara S and Hada T 2018 *Plasma and Fusion Research* **13** 1101014–1101014
8. Кралькина Е А 2008 *Усп. физ. наук* **178** 519–540
9. Arnush D 2000 *Physics of Plasmas* **7** 3042–3050
10. Motomura T, Shinohara S, Tanikawa T and Shamrai K P 2012 *Physics of Plasmas* **19** 043504