

УДК 533.9

## Исследование индуктивного ВЧ-разряда как самосогласованной системы.

### Часть V. Результаты исследования эквивалентного сопротивления индуктивного ВЧ-разряда низкого давления при наличии внешнего магнитного поля\*

*А. Ф. Александров, Г. Э. Бугров, К. В. Вавилин, И. Ф. Керимова, Е. А. Кралькина,  
В. Б. Павлов, В. Ю. Плаксин*  
Физический факультет МГУ, Москва, Россия

*А. А. Рухадзе*  
Институт общей физики РАН, Москва, Россия

*В пятой части серии работ на основании измерений эквивалентного сопротивления экспериментально изучена эффективность ввода ВЧ-мощности в индуктивный ВЧ-разряд низкого давления при наличии внешнего магнитного поля. Проведено сравнение результатов экспериментов с численными расчетами, основанными на теоретических результатах, полученных ранее.*

\* Части I, II, III, IV данной серии статей опубликованы в журнале "Прикладная физика" № 4 и 5, 2005 г.; № 1 и 2, 2006 г., соответственно.

Настоящая серия статей посвящена анализу особенностей поведения индуктивного ВЧ-разряда как самосогласованной системы, в которой мощность ВЧ-генератора распределяется между двумя каналами: элементами внешней цепи, имеющими активное сопротивление, и плазмой, причем доля мощности, поглощаемая плазмой, зависит от параметров самой плазмы. Во второй работе цикла [1] представлены результаты совместного экспериментального исследования параметров плазмы и эффективности поглощения ВЧ-мощности плазмой индуктивного ВЧ-разряда в аргоне при давлениях 1,6—5 мТорр без магнитного поля и при магнитных полях, соответствующих условиям ЭЦР и условиям возбуждения в плазме геликонов и волн Трайвелписа-Голда. Показано, что нелинейная зависимость плотности плазмы от величины магнитного поля является следствием нелинейного поглощения ВЧ-мощности плазмой. В работе [1] и ранее в работах [2—6] показано, что удобной характеристикой способности плазмы поглощать ВЧ-мощность является эквивалентное сопротивление плазмы  $R_{pl}$ , которое зависит как от параметров плазмы, так и от геометрических размеров источника плазмы, величины внешнего магнитного поля, типа индуктора. Более того [2—6], закономерности изменения эквивалентного сопротивления с изменением условий эксперимента несут в себе информацию об основных физических механизмах поглощения ВЧ-мощности плазмой. В

настоящей работе на основании измерений эквивалентного сопротивления экспериментально изучена эффективность ввода ВЧ-мощности в индуктивный ВЧ-разряд низкого давления при наличии внешнего магнитного поля. Кроме того, проведено сравнение результатов экспериментов с численными расчетами, основанными на теоретических результатах, полученных в работах [2—6].

#### Схема экспериментальной установки и методика измерений

Экспериментальная установка, использованная в данной работе, подробно описана в [1, 7, 8]. В настоящей работе, так же как и в работе [8], применялись источники плазмы, представляющие собой цилиндрическую стеклянную газоразрядную камеру (ГРК), расположенную между двумя диэлектрическими фланцами, внутренняя поверхность которых закрыта стеклом (см. рис. 1 в [8]). Использовались камеры с внутренним диаметром 15 и 22 см, длиной 10, 15, 20 и 25 см, толщина стенок стеклянных цилиндров равнялась 3 мм. Откачка источников производилась через нижний фланец, в котором были выполнены специальные отверстия. На нижнем фланце был также смонтирован газовод, через который в разряд подавался рабочий газ с заданным расходом.

Для возбуждения и поддержания разряда в источниках плазмы использовались спиральные антенны, расположенные на внешней торцевой или боковой поверхности (см. рис. 2 в [8]). Антенна была выполнена из медной трубки диаметром 3 мм и охлаждалась потоком воды. Магнитное поле в источниках плазмы создавалось с помощью магнитных систем, основанных на электромагнитах. Использовались соленоиды, позволяющие изменять индукцию осевого магнитного поля внутри источника плазмы в диапазоне 0—30 мТл с неоднородностью порядка 30 %.

Для возбуждения и поддержания разряда в источниках плазмы спиральная антенна через согласующее устройство подсоединялась к ВЧ-генератору. Основной объем работы был выполнен с помощью ВЧ-генераторов ГТВЭ-1000, работающих на частоте 13,56 МГц и позволяющих плавно регулировать мощность в диапазоне от 0 до 1000 Вт. Мощность, отдаваемая генератором во внешнюю цепь  $P_{Gen}$ , определялась как разница между падающей  $P_F$  и отраженной  $P_R$  мощностями, измеряемыми с помощью измерителя мощности CN-101L, включенного в 50-омную линию между ВЧ-генератором и системой согласования. В процессе экспериментов отраженная мощность составляла 1—10 % от падающей.

Для определения доли мощности, поглощенной плазмой, и эквивалентного сопротивления плазмы в точке А был встроен датчик ВЧ-тока, сигнал с которого поступал на вход двухлучевого осциллографа С1-122А или вход ВЧ-платы аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Основанием для измерения эквивалентного сопротивления плазмы в настоящей работе явилась формула [1]

$$P_{Gen} = I^2 (R_{Ant} + R_{Pl}),$$

связывающая мощность ВЧ-генератора  $P_{Gen}$ , отдаваемую во внешнюю цепь с током  $I$ , текущим через антенну, сопротивлением антенны  $R_{Ant}$  и эквивалентным сопротивлением плазмы  $R_{Pl}$ .

Отметим, что в реальных экспериментах сопротивление антенны включает в себя потери на нагрев элементов системы согласования, антенны, металлических частей установки, расположенных вблизи источника плазмы, вследствие возбуждения в них индукционных токов, ВЧ-разъемов и т. д. В связи с этим измерения и обработка результатов экспериментов проводились по следующей схеме.

1. Сначала определялось эффективное сопротивление антенны по формуле

$$R_{Ant} = P_{Gen} / I_0^2,$$

где  $I_0$  — ток через антенну без разряда.

2. Измерялась зависимость тока через антенну от мощности ВЧ-генератора с разрядом при различных фиксированных значениях внешнего магнитного поля. Полученные данные использовались для расчета сопротивления внешней це-

пи, включающего в себя эквивалентное сопротивление антенны и эквивалентное сопротивление плазмы, по формуле

$$R_{Ant} + R_{Pl} = P_{Gen} / I^2.$$

3. Из значений сопротивления нагрузки вычитались значения сопротивления антенны

$$R_{Pl} = P_{Gen} / I^2 - R_{Ant}.$$

Таким образом определялось эквивалентное сопротивление плазмы, по которому вычислялась доля ВЧ-мощности, поглощаемая плазмой  $P_{Pl}$

$$P_{Pl} = R_{Pl} I^2.$$

Относительная и абсолютная погрешности в измерении эквивалентного сопротивления составляли величину порядка 20 и 50 % [8].

### Результаты экспериментов

На рис. 1—2 показаны зависимости эффективного сопротивления от мощности ВЧ-генератора, измеренные при различных значениях магнитного поля в источнике плазмы диаметром 15 см и длиной 20 см, при условии возбуждения разряда в аргоне при давлении 3 мТорр с помощью антенн различного типа. Как видно, зависимость эффективного сопротивления от мощности ВЧ-генератора существенно зависит от типа антенны. В случае спиральной антенны, расположенной на боковой поверхности источника плазмы (далее — боковая антенна), эквивалентное сопротивление плазмы растет с увеличением мощности генератора, причем увеличение магнитного поля в рассмотренном диапазоне сопровождается монотонным ростом эквивалентного сопротивления. Скачкообразный переход из "низкой" моды разряда в "высокую" отсутствует. В случае спиральной антенны, расположенной на верхнем фланце источника плазмы (далее — верхняя антенна), увеличение мощности генератора приводит при некотором граничном значении мощности  $P_f$  к скачкообразному росту эффективного сопротивления плазмы, затем  $R_{Pl}$ , пройдя через максимум, убывает с ростом мощности. Рост магнитного поля приводит к увеличению значений эквивалентного сопротивления и смещению значений  $P_f$  в область больших мощностей, что подробно описано в [9]. Погрешность определения эквивалентного сопротивления разряда до скачка существенно выше. В связи с этим необходимо отметить, что значения  $R_{Pl}$ , полученные до скачка, приведены лишь для иллюстрации особенностей поведения разряда и анализа изменения положения  $P_f$  при изменении внешних условий.

Значения эквивалентного сопротивления плазмы, полученные при различных значениях мощности ВЧ-генератора и индукции внешнего

магнитного поля, были использованы для нахождения зависимости  $R_{Pl}$  от величины  $B$ . В соответствии с данными работы [1] предполагалось, что при фиксированной мощности, вкладываемой

в плазму, величина средней по объему плотности плазмы является слабоменяющейся функцией внешнего магнитного поля.

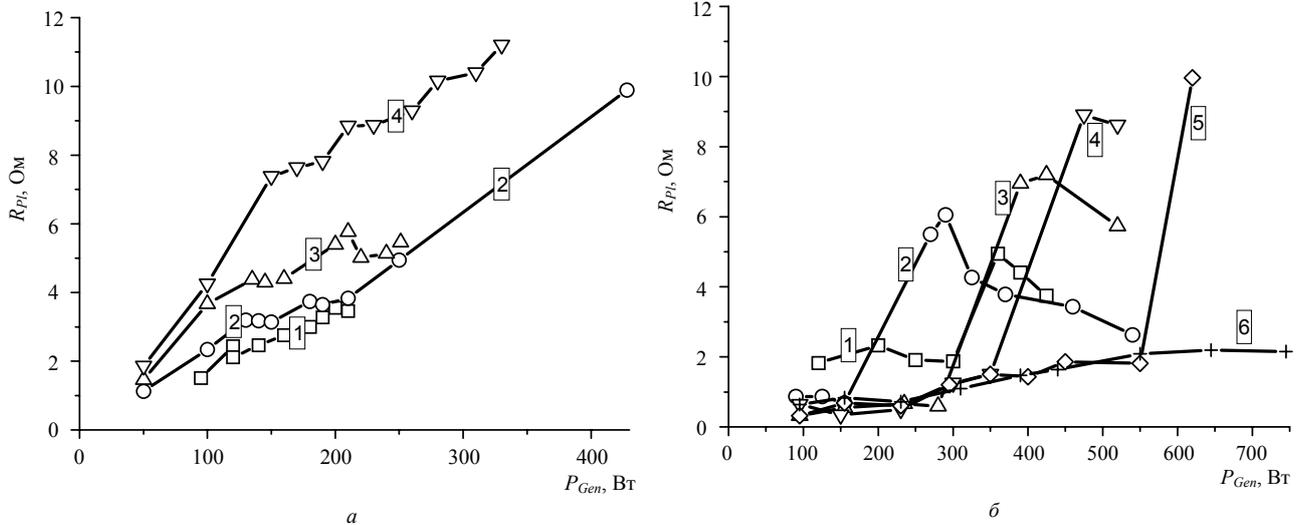


Рис. 1. Зависимость эквивалентного сопротивления плазмы от мощности ВЧ-генератора в случае возбуждения разряда: а — боковой спиральной антенной при магнитных полях 1—4 в диапазоне 0,4—6 мТл; б — верхней спиральной антенной при магнитных полях 1—6 в диапазоне 0,4—6 мТл

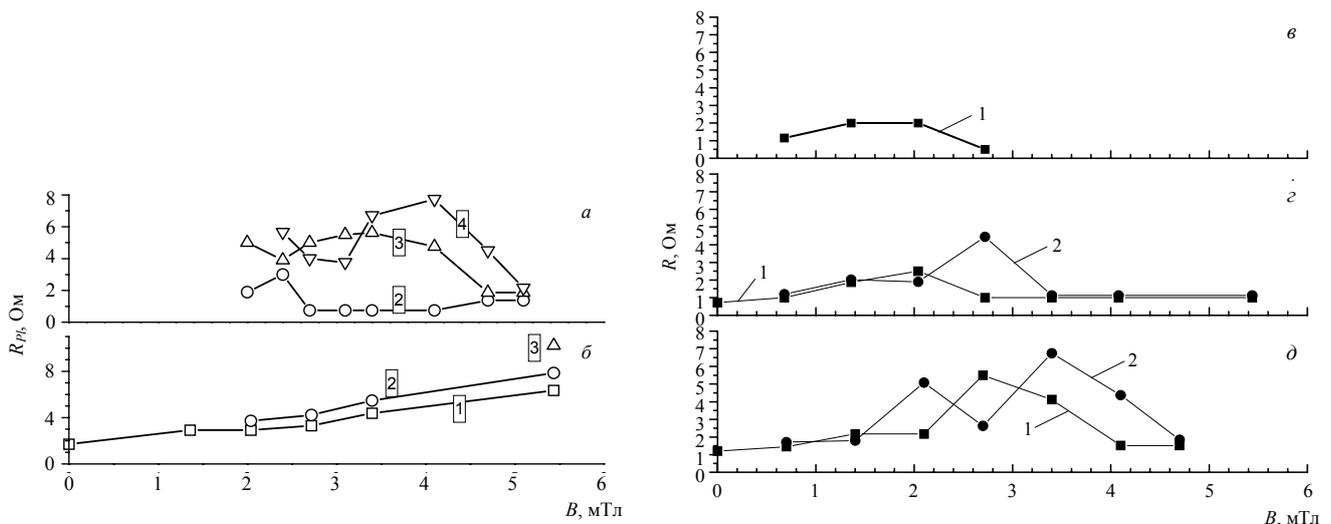


Рис. 2. Зависимость эквивалентного сопротивления плазмы аргона: от внешнего магнитного поля при условии возбуждения разряда с помощью верхней (а) и боковой (б) спиральных антенн длиной 20 см при значениях  $P_{Pl}$ , равных 1 — 100; 2 — 150; 3 — 250; 4 — 350 Вт (давление 2 мТорр); от внешнего магнитного поля при условии возбуждения разряда с помощью верхней спиральной антенны длиной  $\ell$  — 10;  $\ell$  — 15;  $\ell$  — 20 см при значениях  $P_{Pl}$ , равных 1 — 150; 2 — 225 Вт (давление 5 мТорр)

На рис. 2, а, б показаны зависимости  $R_{Pl}$  от магнитного поля, полученные с использованием верхней и боковой спиральных антенн. Отметим, что в соответствии с результатами, полученными в теоретических работах [6], для рабочей частоты 13,56 МГц область магнитных полей 0,4—1 мТл соответствует условиям ЭЦР, а область  $B > 1$  мТл — условиям возбуждения геликонов и волн Трайвеллписа—Голда. Как видно, для "геликонной" области характерна немонотонная зависимость эквивалентного сопротивления от магнитного поля, причем немонотонность  $R_{Pl}(B)$  в случае верхней спиральной антенны выражена значительно сильнее. Увеличение

вкладываемой мощности, т. е. концентрация плазмы [1], приводит к росту эквивалентного сопротивления и смещению основного максимума функции  $R_{Pl}(B)$  в область больших магнитных полей.

Наличие немонотонной зависимости эквивалентного сопротивления от магнитного поля в "геликонной" области при низких давлениях рабочего газа было зафиксировано при работе со всеми источниками плазмы, причем, как видно из рис. 2, в, г, д, немонотонность усиливается с ростом длины источника плазмы. Увеличение давления в диапазоне давлений  $10^{-3}$ — $10^{-2}$  Торр, как видно из рис. 3, а, б, в, не приводит к существен-

ным изменениям характера зависимости  $R_{pl}(B)$ , однако при давлениях, превышающих  $10^{-2}$  Торр, немонотонность зависимости эквивалентного сопротивления от магнитного поля исчезает.

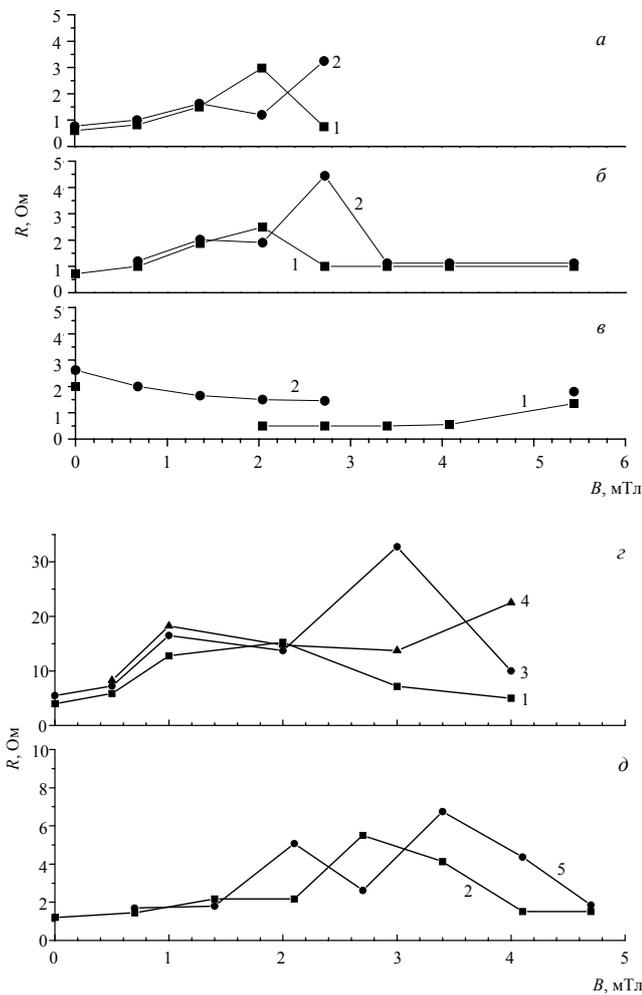


Рис. 3. Зависимость эквивалентного сопротивления плазмы аргона от внешнего магнитного поля при условии возбуждения разряда с помощью верхней спиральной антенны в источнике плазмы: диаметром 15 см, длиной 15 см при давлении: а — 2; б — 5; в — 10 мТорр и значениях  $P_{pl}$ , равных 1 — 150; 2 — 250 Вт; длиной 20 см, диаметром: г — 22 и д — 15 см при давлениях аргона 5 мТорр и значениях  $P_{pl}$ , равных 1 — 150; 2 — 150; 3 — 200; 4 — 225; 5 — 275 Вт

Из рис. 2—3 видно, что при давлениях аргона, меньших 10 мТорр, эквивалентное сопротивление плазмы без магнитного поля существенно меньше по величине, чем в "геликонной" области. Величины  $R_{pl}$ , полученные для области ЭЦР, занимают промежуточное положение, причем здесь эквивалентное сопротивление монотонно увеличивается с магнитным полем. Абсолютные значения эквивалентного сопротивления растут с увеличением длины и диаметра источника плазмы (см. рис. 3, г, д), падают при увеличении давления аргона. При давлениях аргона, превышающих  $10^{-2}$  Торр, эквивалентные сопротивления плазмы как при магнитных полях, соответствующих условиям ЭЦР, так и при магнитных полях, соответствующих условиям возбуждения геликонов и волн Трайвелпис-

Голда, существенно уменьшаются и становятся меньше значений эквивалентного сопротивления плазмы без магнитного поля.

При работе с боковой антенной были получены результаты, качественно подобные представленным на рис. 2, в, г, д и рис. 3, однако немонотонность зависимости эквивалентного сопротивления от магнитного поля в рассмотренном диапазоне была выражена слабее. Кроме того, замена аргона гелием, воздухом или ксеноном качественно не изменила описанных выше зависимостей эквивалентного сопротивления от внешнего магнитного поля и параметров разряда. В случае ксенона при работе с верхней антенной немонотонность зависимости эквивалентного сопротивления от магнитного поля была выражена даже слабее, чем в аргоне и гелии. Абсолютные значения эквивалентного сопротивления имеют наименьшие показатели в случае гелия и наибольшие — в случае ксенона.

Чтобы разобраться в физических причинах наблюдавшихся закономерностей, целесообразно сравнить экспериментальные данные со значениями эквивалентного сопротивления, рассчитанными на основании формул, полученных в теоретических работах [2—6]. Результаты расчета эквивалентного сопротивления плазмы в области ЭЦР по формулам, полученным в [6], показаны на рис. 4. Можно видеть, что положения максимума зависимости эквивалентного сопротивления от магнитного поля  $B$  не соответствуют равенству рабочей  $\omega$  и циклотронной  $n_e$  частот. Увеличение концентрации электронов приводит к смещению резонансной частоты  $\omega_{res}$  (положения максимума  $R_{pl}(n_e)$ ) в область больших магнитных полей, на что указывалось в работе [6]. Одновременно со смещением  $\omega_{res}$  возрастают и резонансные значения  $R_{pl}$ , причем абсолютные значения эквивалентного сопротивления существенно выше, чем полученные для индуктивного разряда без магнитного поля при низких давлениях.

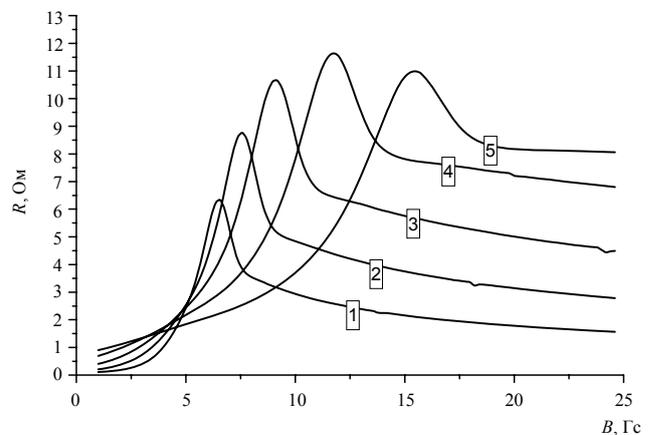


Рис. 4. Зависимость эквивалентного сопротивления плазмы от магнитного поля. Давление нейтрального газа 1 мТорр,  $R = 7,5$  см:  
1 —  $n_e = 3 \cdot 10^9$ ; 2 —  $n_e = 10^{10}$ ; 3 —  $n_e = 3 \cdot 10^{10}$ ; 4 —  $n_e = 10^{11}$ ;  
5 —  $n_e = 3 \cdot 10^{11}$

Рост давления рабочего газа (рис. 5) приводит к понижению значений эквивалентного сопротивления и смещению максимума  $R_{pl}$  в область больших концентраций плазмы. Отметим, что наибольшие значения эквивалентного сопротивления удается получить в бесстолкновительном пределе. Этот результат противоположен наблюдаемому в случае индуктивного разряда без магнитного поля.

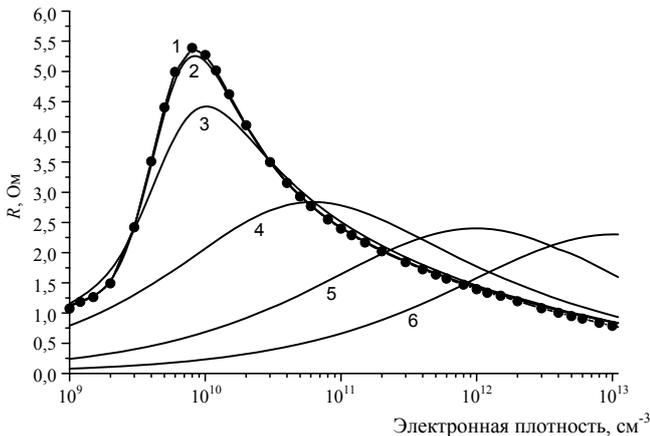


Рис. 5. Зависимость эквивалентного сопротивления плазмы от плотности плазмы при различных давлениях рабочего газа.  $R = 5$  см:

1—6 — изменения давления от  $10^{-3}$  до  $10^{-2}$  Торр

Сравнение результатов расчета с результатами экспериментов показывает, что расчетные в области ЭЦР  $R_{pl}$ , так же как и экспериментальные значения эквивалентного сопротивления при низких давлениях, превышают величины, полученные в индуктивном разряде без магнитного поля. Тенденция изменения расчетного эквивалентного сопротивления плазмы при увеличении давления также качественно совпадает с измеренной экспериментально. Однако в эксперименте в отличие от расчетов не наблюдается резонансов  $R_{pl}$  при магнитных полях, типичных для ЭЦР. По-видимому, последний факт можно объяснить тем, что положение резонансов, найденных расчетным путем, лежит в пограничной области магнитных полей между магнитными полями, где справедливы приближения ЭЦР, и магнитными полями, где возможно возбуждение геликонов и волн Трайвелписа—Голда [2, 6].

На рис. 6 представлены типичные зависимости  $R_{pl}$  от магнитного поля, рассчитанные при давлении аргона  $10^{-3}$  Торр и различных значениях концентрации плазмы. Как видно, при низких давлениях функции  $R_{pl}$  имеют осцилляционный характер, причем период осцилляций существенно различается при низких ( $n_e < 10^{12}$  см $^{-3}$ ) и высоких ( $n_e \geq 10^{12}$  см $^{-3}$ ) концентрациях плазмы.

Увеличение давления приводит сначала к уменьшению амплитуды осцилляций, а затем к их исчезновению.

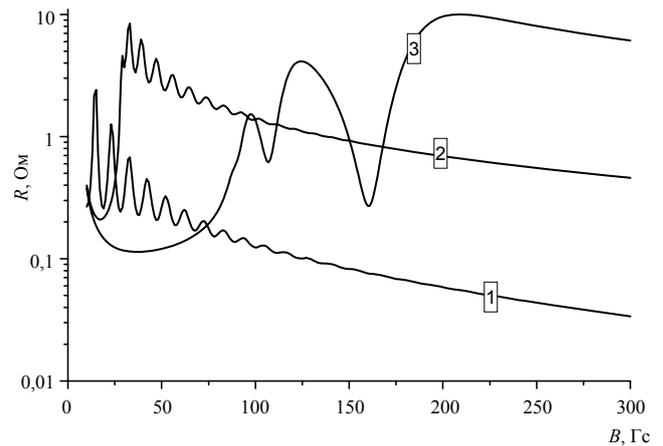


Рис. 6. Зависимость эквивалентного сопротивления плазмы от магнитного поля для различных плотностей плазмы: 1 —  $n_e = 10^{10}$ , 2 —  $n_e = 10^{11}$ , 3 —  $n_e = 10^{12}$

В работе [2] подробно изучена физическая природа отмеченных особенностей поведения эквивалентного сопротивления, связанная с особенностями возбуждения и поглощения геликонов и волн Трайвелписа—Голда. Как показано в [2], при давлении аргона 1 мТорр, небольших значениях концентрации электронов ( $n_e < 10^{12}$  см $^{-3}$ ) и магнитных полях  $B < 15$  мТл основную роль в поглощении ВЧ-мощности играет волна Трайвелписа—Голда. Именно осцилляционная зависимость амплитуд электрических полей волны Трайвелписа—Голда приводит к немонотонному изменению эквивалентного сопротивления плазмы с ростом магнитного поля. Увеличение частоты электронных столкновений приводит к понижению амплитуды осцилляций и их исчезновению [2]. При высоких концентрациях электронов  $n_e \geq 10^{12}$  см $^{-3}$ , при повышении давления аргона до 10 мТорр и в случае сильных магнитных полей  $B > 20$  мТл все компоненты электрического поля геликона превосходят соответствующие компоненты волны Трайвелписа—Голда (рис. 7). В указанном диапазоне экспериментальных условий основную роль в поглощении ВЧ-мощности в плазме играют электрические поля геликонов, период осцилляций которых существенно больше.

Сравнение результатов расчета с результатами экспериментов показывает, что расчетные в "геликонной" области  $R_{pl}$ , так же как и экспериментальные значения эквивалентного сопротивления при низких давлениях, превышают величины, полученные в индуктивном разряде без магнитного поля и в области ЭЦР. Обнаруженное в экспериментах при низких давлениях немонотонное изменение эквивалентного сопротивления с увеличением магнитного поля является проявлением осцилляционной зависимости амплитуд электрических ВЧ-полей, возбуждаемых в плазме, от магнитного поля. Тенденция изменения расчетного эквивалентного сопротивления плазмы при увеличении давления также качественно совпадает с измеренной экспериментально.

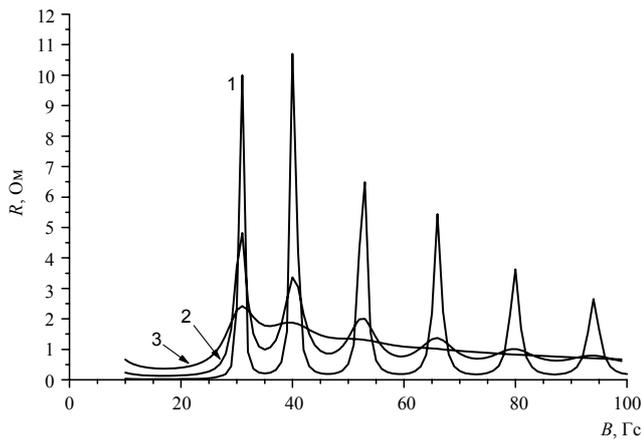


Рис. 7. Зависимости эквивалентного сопротивления плазмы от магнитного поля, рассчитанные для различных давлений нейтрального газа. Радиус источника 5 см, длина 15 см, плотность плазмы —  $1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ . Расчет выполнен по формулам [2]:  
 1 —  $1 \cdot 10^{-3}$  Торр; 2 —  $2 \cdot 10^{-3}$  Торр; 3 —  $1 \cdot 10^{-2}$  Торр

В заключение перечислим основные результаты, полученные в настоящем экспериментальном исследовании:

1. В случае ВЧ индуктивного разряда низкого давления ( $p < 10$  мТорр) использование внешнего магнитного поля приводит к значительному повышению эффективности ввода ВЧ-мощности в плазму в области ЭЦР и области возбуждения геликонов и волн Трайвелписа—Голда. В последней значения эквивалентного сопротивления выше, чем в области ЭЦР.
2. В области ЭЦР эквивалентное сопротивление плазмы монотонно изменяется с увеличением магнитного поля.
3. Увеличение давления приводит к увеличению эквивалентного сопротивления плазмы без магнитного поля и уменьшению эквивалентного сопротивления разряда с магнитным полем.

4. Эквивалентное сопротивление плазмы в области низких давлений увеличивается с увеличением радиуса и длины источника плазмы.

5. Наибольшие значения эквивалентного сопротивления при наличии магнитного поля удается получить в разряде, возбуждаемом боковой спиральной антенной.

**Л и т е р а т у р а**

1. Александров А. Ф., Бугров Г. Э., Вавилин К. В., Керимова И. Ф., Кралькина Е. А., Павлов В. Б., Плаксин В. Ю., Рухадзе А. А. Исследование индуктивного ВЧ-разряда как самосогласованной системы. Часть II. Исследование параметров плазмы и эффективности поглощения ВЧ-мощности плазмой индуктивного ВЧ-разряда низкого давления// Прикладная физика, 2005. № 5. С. 72—78.
2. Александров А. Ф., Бугров Г. Э., Вавилин К. В., Керимова И. Ф., Кралькина Е. А., Павлов В. Б., Плаксин В. Ю., Рухадзе А. А. // Физика плазмы. 2004. Т. 30. № 5.
3. Вавилин К. В., Плаксин В. Ю., Ри М. Х., Рухадзе А. А. // ЖТФ. 2004. Т. 74. № 5. С. 44—49.
4. Вавилин К. В., Плаксин В. Ю., Ри М. Х., Рухадзе А. А. // Там же. № 6.
5. Вавилин К. В., Плаксин В. Ю., Ри М. Х., Рухадзе А. А. // Там же. № 6.
6. Вавилин К. В., Плаксин В. Ю., Ри М. Х., Рухадзе А. А. // Физика плазмы 2004. Т. 30. № 8.
7. Александров А. Ф., Бугров Г. Э., Вавилин К. В., Керимова И. Ф., Кралькина Е. А., Павлов В. Б., Плаксин В. Ю., Рухадзе А. А. Исследование индуктивного ВЧ-разряда как самосогласованной системы. Часть I. Особенности, наблюдавшиеся при экспериментальном исследовании индуктивного ВЧ-разряда, помещенного во внешнее магнитное поле// Прикладная физика. 2005. № 4. С. 70—74.
8. Александров А. Ф., Бугров Г. Э., Вавилин К. В., Керимова И. Ф., Кралькина Е. А., Павлов В. Б., Плаксин В. Ю., Рухадзе А. А. Исследование индуктивного ВЧ-разряда как самосогласованной системы. Часть IV. Результаты исследования эквивалентного сопротивления индуктивного ВЧ-разряда низкого давления без магнитного поля// Там же. 2006. № 2. С. 41—46.
9. Александров А. Ф., Бугров Г. Э., Вавилин К. В., Керимова И. Ф., Кралькина Е. А., Павлов В. Б., Плаксин В. Ю., Рухадзе А. А. Исследование индуктивного ВЧ-разряда как самосогласованной системы. Часть III. Исследование влияния емкостной составляющей на параметры плазмы индуктивного ВЧ-разряда низкого давления// Там же. 2006. № 1. С. 36—42.

Статья поступила в редакцию 30 марта 2005 г.

**Examination of an inductive high-frequency discharge as the self-consistent system.**

**Part V. Results of examination of an equivalent resistance for the inductive high-frequency discharge at a low pressure and at an exterior magnetic field**

*A. F. Aleksandrov, G. E. Bugrov, K. V. Vavilin, I. F. Kerimova, E. A. Kralkina, V. B. Pavlov, V. Yu. Plaksin*  
 Physical Faculty of the Moscow State University, Moscow, Russia

*A. A. Rukhadze*  
 General Physics Institute, Moscow, Russia

*In the fifth part of a series of operations the efficiency of input of RF power in an inductive high-frequency discharge of low pressure at presence of an exterior magnetic field has been experimentally studied on the basis of measuring an equivalent resistance. The matching of experimental results with results of numerical calculations has been is carried out.*

\* \* \*