

МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(национальный исследовательский университет)

*На правах рукописи*

**Рябый Валентин Анатольевич**

**ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ И  
ВЫСОКОЧАСТОТНО-ИНДУКЦИОННЫХ  
ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ПРИБОРОВ**

1.3.9 – Физика плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени

доктора физико-математических наук

Москва – 2021

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

Электродуговые приборы со стержневым катодом и сопловым анодом обычно работают при относительно невысоких электрических напряжениях  $\sim 10^1$ – $10^2$  В с током разряда  $\sim 10^2$ – $10^3$  А. Их традиционная контрагированная анодная привязка при удельной эрозии анода  $\sim 10^{-6}$  г/Кл загрязняет плазменную струю парами анодного материала и обеспечивает весьма ограниченный технический ресурс порядка  $10^0$  час. В этой связи использование таких приборов довольно ограничено: электродуговая резка металлов, генерирование углеродной или боровской плазмы, нанесение антикоррозионных или износостойких покрытий, для которых примеси паров анодного металла не имеют существенного значения. Замена контрагированных анодных привязок в таких приборах распределёнными привязками дуговых разрядов для очистки генерируемой плазмы и повышения технического ресурса этих устройств значительно расширяет их технические применения, что представило весьма актуальную задачу. Оценка рабочих процессов данных приборов с помощью интегральной диагностики, определяющей среднюю проводимость плазмы в положительном столбе дуги и её температуру (при известной температурной зависимости измеряемой проводимости плазмы), усиливает актуальность данной задачи.

Высокочастотно-индукционные (ВЧИ) газоразрядные приборы активно используются как в технологических плазменных ВЧИ источниках, так и в ВЧИ ионных источниках (ВЧИИ) или ионных двигателях (ВЧИД), применяемых для решений технологических и космических задач. В этой связи разработка и экспериментальная апробация интегральной диагностики таких приборов для оценки их рабочих процессов и конструкций, а также уточнённая и расширенная локальная диагностика их плазмы с целью оценки и дальнейшего развития их конструкций для повышения эффективности их практических применений также являются вполне актуальными задачами. Исследованию ВЧИ газоразрядного узла ионного источника и дальнейшему

развитию его интегральной и локальной диагностики посвящена настоящая работа. Можно отметить, что локальная зондовая диагностика активно применяется не только в ВЧИ приборах, но и во многих разнообразных плазменных источниках, так что её уточнение и расширение измерительных возможностей весьма актуально для широкого круга подобных плазменных устройств.

### **Цели и задачи исследования**

Настоящая работа посвящена развитию интегральной и локальной диагностики плазменных приборов двух видов: 1) электродуговых приборов постоянного тока, которые могут применяться для проведения плазменных и плазмохимических технологических процессов и, возможно, для их использования в качестве космических плазменных двигателей, и 2) ВЧИ газоразрядного узла, который может применяться в виде ВЧИ источника плазмы технологического характера или в качестве ВЧИИ или ВЧИД, которые используются для решения технологических и космических задач.

Цель работы с электродуговыми приборами постоянного тока состояла в разработке двух методов их интегральной диагностики [A22, A2] для измерений средней проводимости плазмы в положительном столбе дуговых разрядов. В случае известной температурной зависимости проводимости их плазмы можно было оценить её состояние определением средней температуры плазмы через измеренные величины проводимости.

Цель интегральной диагностики ВЧИ газоразрядного узла состояла в определении детального энергобаланса ВЧ мощности в линии электропитания разряда для оценки особенностей его рабочего процесса и конструкции и для определения возможности повышения его энергоэффективности [A3]. В плане локальной зондовой диагностики плазмы ВЧИ газоразрядного узла нужно было повысить точность зондовых измерений для обеспечения объективности определения уровней и пространственных распределений параметров его плазмы в газоразрядной камере (ГРК) [A8], а также попытаться расширить возможности зондовой

диагностики максвелловской плазмы [A14] и упростить оценку плотности ионного тока на эмиссионный электрод ионно-оптической системы (ИОС) ВЧИИ или ВЧИД [A12].

Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

1. Для электродуговых приборов постоянного тока были разработаны два варианта их конструкций (Т-плазматрон и А-плазматрон) с резким понижением эрозии анода, что существенно увеличило их технический ресурс и повысило чистоту генерируемой плазмы. Удельная эрозия их анодов была измерена прямым весовым способом с погрешностью порядка 3%. Оказалось, что оба варианта этих конструкций обеспечили данный параметр на уровне  $10^{-10}$  г/Кл, что примерно в 10 000 раз понизило традиционную удельную эрозию анода порядка  $10^{-6}$  г/Кл, которая имела место в обычных дуговых устройствах с контрагированными анодными привязками. При этом технический ресурс данных электродуговых приборов достиг уровня  $10^4$  час., а их плазменные потоки стали спектрально чистыми. Специфические конструкции этих приборов позволили разработать интегральную диагностику № 1 измерения средней проводимости плазмы в их анодных каналах [A22], который оказался модифицированным методом вольтамперных характеристик (ВАХ) в отличие от стандартного метода ВАХ, применяемого в стабилизирующих каналах электродуговых устройств.

Разработана и реализована электротехническая интегральная диагностика № 2, применимая в обоих вариантах электродуговых приборов постоянного тока со стабилизирующим каналом путём сочетания измерений средней проводимости плазмы в этом канале стандартным методом ВАХ и высокочастотным (ВЧ) контурным методом [A2]. Это позволило определять толщины непроводящих газовых погранслоёв в данном канале и уточнять среднюю проводимость его плазменного потока.

Для А-плазматрона разработана интегральная диагностика измерением срока хранения сельхозпродуктов, обдуваемых его биомедицинской воздушной плазмой атмосферного давления, поддерживающей товарный вид

и пищевую ценность этих продуктов, что обеспечило удлинённый срок качественного их хранения.

2. Электротехнической интегральной диагностикой ВЧИ газоразрядного узла был определён его детальный энергобаланс, включивший паразитные утечки ВЧ мощности в линии электропитания разряда и определивший пути повышения его энергоэффективности [А3]. Эта интегральная диагностика была расширена измерением давления плазмы ВЧИ разряда, что позволило оценить состояние изучаемой плазмы по степени её ионизации.

Для модели ВЧИИ-10, созданной на основе данного ВЧИ газоразрядного узла, была усовершенствована газоэлектрическая развязка её газоразрядного узла для подачи в неё рабочего газа.

3. Разработан и реализован метод уменьшения влияния ближайшего зондодержателя на результаты диагностики путём измерений концентрации электронов плазмы цилиндрическими зондами разных длин [32].

4. Проведены зондовые измерения пространственных распределений параметров ксеноновой плазмы в половине объёма ГРК, размещённой перед ИОС [А5].

5. Определены возмущения функций распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) изучаемой плазмы в виде их отклонений от максвелловских функций, которые были вычислены в виде отношений измеренных и расчётных (по Максвеллу) плотностей электронного тока насыщения на зонд [А3].

6. Разработаны и реализованы метод и устройство повышения точности измерений параметров плазмы зондами Ленгмюра с изолированными защитными экранами при использовании основного зонда-1 и дополнительного зонда-2, у которых имелась общая позиция, где экран<sub>1</sub>=0 и экран<sub>2</sub>≠0 [А8].

7. Разработан метод измерений цилиндрическим зондом Ленгмюра коэффициента Бома, толщин зондовых слоёв и средней массы ионов в максвелловской плазме для двух моделей зондового слоя при отсутствии в

нём электронов и при их наличии; установлена близость изучаемой плазмы к максвелловской среде, позволившая реализовать в ней данный метод [A16].

8. Разработаны и реализованы метод и устройство упрощённой оценки плотности ионного тока на ИОС.

9. Выявлено новое количественное физическое явление короткозамкнутого двойного макро-зонда в его неизолированном защитном экране при уточнении параметров плазмы в ВЧИ приборе новым методом повышения точности измерений зондами с неизолированными экранами.

### **Методология и методы диссертационного исследования**

В ходе данной работы диссертантом были разработаны 8 методов интегральной и локальной диагностики изучаемых приборов:

1. В данной работе использовались два варианта электродуговых приборов постоянного тока со стержневым катодом и сопловым анодом, у которых удельная эрозия их анодов была понижена мною до уровня  $10^{-10}$  г/Кл. Для этих приборов были разработаны два вида их интегральной диагностики в плане измерений средней проводимости дуговой плазмы: 1) в анодных каналах обоих вариантов приборов путём анализа ВАХ разрядов с распределённой анодной привязкой на выходе из анода и для свободно горящей дуги с контрагированной анодной привязкой до входа в удлинённый анодный канал [A22]; 2) в стабилизирующем межэлектродном канале дугового разряда, который может быть использован в обоих электродуговых приборах постоянного тока, путём сочетания разработанного ВЧ контурного метода со стандартным методом ВАХ [A2]. Для А-плазматрона, работающего с атмосферной воздушной плазмой, создан метод обдува сельхозпродуктов для увеличения сроков их хранения при повышенном качестве [И10].

2. Методика детальной электротехнической интегральной диагностики ВЧИ газоразрядного узла, расширившая его энергобаланс [A3].

3. Метод исследования измерительных размеров цилиндрического зонда Ленгмюра с избранным диаметром ближайшего зондодержателя и

различными длинами его измерительной нити для организации наперёд заданного малого снижения параметров плазмы рекомбинацией заряженных частиц на ближайшем зондодержателе [32].

4. Метод количественной оценки отклонений реальных ФРЭЭ плазмы от функций Максвелла, характеризующий состояние изучаемой плазмы в виде отношений измеренных и рассчитанных (по Максвеллу) плотностей электронного тока насыщения на зонд [А6].

5. Метод и устройство повышения точности измерений параметров плазмы традиционным зондом Ленгмюра с неизолированным металлическим защитным экраном [А8].

6. Метод измерений цилиндрическим зондом Ленгмюра коэффициента Бома, толщин зондовых слоёв и средней массы ионов в максвелловской плазме для двух основных моделей зондового слоя [А16].

7. Метод и устройство для упрощённой оценки плотности ионного тока на эмиссионный электрод ИОС с помощью имитатора плоского пристеночного зонда в торце радиально подвижного керамического стержня [А12].

### **Объект и предмет исследования**

Объектами исследования в настоящей работе явились газоразрядные приборы двух видов: а) два высокоресурсных электродуговых прибора постоянного тока, генерировавшие спектрально чистую плазму, в которых проводились два метода интегральной диагностики путём измерений средней проводимости плазмы в положительном столбе дуги, б) ВЧИ газоразрядный узел ионного источника, в котором проводилась интегральная электротехническая диагностика измерением детального энергобаланса в линии электропитания ВЧИ разряда, а также локальная диагностика ВЧИ плазмы в ГРК.

Предметами исследования этих устройств явились разработка и экспериментальная апробация: двух видов интегральной диагностики высокоресурсных электродуговых приборов и одного вида интегральной

диагностики ВЧИ газоразрядного узла, а также уточнённая и расширенная локальная диагностика плазмы ВЧИИ.

### **Научная новизна результатов**

- 1) Разработаны и экспериментально апробированы два новых вида интегральной диагностики созданных мною двух вариантов высокоресурсных электродуговых приборов постоянного тока: а) новый модифицированный метод ВАХ измерения средней проводимости плазмы в их анодных каналах [А22] и б) новый метод сочетания ВЧ контурного метода со стандартным методом ВАХ в их стабилизирующих межэлектродных каналах, который определил толщины их непроводящих погранслоёв и уточнил среднюю проводимость их плазмы [А2];
- 2) для электротехнической интегральной диагностики ВЧИ газоразрядного узла был разработан и экспериментально апробирован новый метод измерения расширенного детального распределения потерь ВЧ мощности в линии электропитания разряда вплоть до измерения паразитных потерь ВЧ мощности в линии его электропитания [А3];
- 3) для устранения влияния ближайшего зондодержателя на результаты измерений цилиндрическим зондом разработан и экспериментально апробирован новый метод измерения концентрации электронов плазмы зондами разных длин, определяющий их размерности без заметного влияния ближайшего зондодержателя на результаты диагностики [32];
- 4) для оценки состояния изучаемой плазмы в виде отклонений её ФРЭЭ от функций Максвелла был разработан и апробирован новый метод использования отношений измеренных и расчётных (по Максвеллу) плотностей электронных токов насыщения на зонд (обозначены символом  $R_M$ ) [А6];
- 5) для повышения точности измерений основным зондом-1 с неизолированным защитным экраном<sup>1</sup> разработаны и апробированы новые метод и устройство определения влияния этого экрана дополнительным зондом-2, имевшим общую позицию с зондом-1, в которой экран<sup>1</sup>

отсутствовал, а экран2 имел размер, заметно понижавший данные зонда-1: определялась физическая зависимость ошибок зонда-2 от параметра  $R_{M2}$ , рассчитывалось радиальное распределение параметра  $R_{M1}$  для зонда-1, и последующее объединение этих зависимостей с исключением  $R_M$  уточнило результаты измерений основным зондом-1 [A7, A8];

б) новый способ определения трёх дополнительных параметров плазмы, близкой к максвелловской среде, а именно, коэффициента Бома, толщин зондовых слоёв и средней массы ионов, для двух моделей зондового слоя (при отсутствии в нём электронов и при их наличии) решением системы уравнения Бома и «закона 3/2» с использованием двух стадий экспериментов: специального при известной массе ионов и общего эксперимента с предварительно найденными коэффициентами Бома для двух моделей зондового слоя [A16];

7) новый способ и устройство упрощённой оценки плотности ионного тока на ИОС с помощью радиально подвижного имитатора плоского пристеночного зонда в торце керамического стержня [A12].

8) новое количественное физическое явление короткозамкнутого двойного макро-зонда в его неизолированном защитном экране, выявленное мною при уточнении параметров плазмы в ВЧИ приборе новым методом повышения точности измерений зондами с неизолированными экранами [A7, A8].

### **Научная и практическая значимость работы**

Настоящая работа представляет законченное исследование, охватывающее разработку и экспериментальную апробацию: двух способов интегральной диагностики двух вариантов высокоресурсных электродуговых приборов постоянного тока со стержневыми катодами и сопловыми анодами, одного способа интегральной электротехнической диагностики ВЧИ газоразрядного узла, дополненного измерением давления его плазмы в силу удобства его конструкции, трёх способов локальной диагностики данного газоразрядного узла, позволивших устранить влияние ближайшего зондодержателя на результаты измерений параметров плазмы, определить

состояние плазмы по отношениям плотностей электронного тока насыщения на зонд к таким же максвелловским расчётным параметрам, характеризующее влияние неизолированного защитного экрана зонда на результаты его измерений, и на этой основе уточнить измерения цилиндрическим зондом с таким экраном, а также двух дополнительных возможностей зондовой диагностики: способа измерений 3-х дополнительных параметров максвелловской плазмы, к которой оказалась близка изучаемая плазма ВЧИ газоразрядного узла, и способа оценки плотности тока ионов на эмиссионный электрод ИОС с помощью радиально подвижного имитатора плоского пристеночного зонда в торце керамического стержня.

Результаты создания и апробации расширенной диагностики электродуговых приборов постоянного тока и ВЧИ газоразрядного узла источника ионов, а также при разработках различных родственных им устройств могут быть полезны для определения особенностей их рабочих процессов и дальнейшего развития их конструкций.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Новый модифицированный метод ВАХ **интегральной** диагностики высоко-ресурсных Т- и А-плазматронов, определяющий среднюю проводимость плазмы в их анодных каналах с помощью дуговых разрядов с анодными привязками двух видов: 1) распределёнными на выходе из анодного канала при его начальной длине (в нём дуговой разряд стабилизирован) и 2) контрагированными у входа в удлинённый анодный канал (со свободно горящей дугой перед ним); этот метод был реализован в Т-плазматроне: из его 2-й ВАХ было вычтено известное анодное падение потенциала, и его 1-я ВАХ с учётом остатка 2-й ВАХ показала распределение потенциала в анодном канале, которое определило среднюю проводимость его плазмы стандартным методом ВАХ (по закону Ома:  $\sigma = I/\pi a^2 E$ , где  $a$  – радиус анодного канала) [22];

- точность измерений параметров дуги  $\sim \pm(5-7)\%$  обеспечила погрешность измерений проводимости плазмы до  $\pm 14\%$ ; данная диагностика расширяет оценки рабочих процессов этих приборов.

2. Новый метод **интегральной** диагностики электродуговых плазматронов с межэлектродными стабилизирующими каналами путём объединения стандартного метода ВАХ и ВЧ контурного метода для совместных измерений ими средней проводимости плазмы в этих каналах; сопоставление их расчётных выражений определило толщины непроводящих погранслоёв и повышенную среднюю проводимость плазмы [А2];

- измерение добротности катушки индуктивности с точностью  $\sim \pm(5-8)\%$  обеспечило погрешность измерений проводимости плазмы до  $\pm 20\%$ ; эта диагностика обогащает стандартный метод ВАХ и позволяет уточнять состояние плазмы в стабилизирующих каналах любых электродуговых плазматронов.

3. Новый метод **интегральной** диагностики высоко-ресурсного электродугового А-плазматрона путём обдува им сельхозпродуктов биомедицинской воздушной плазмой атмосферного давления (при поддержке данной плазмой их товарных видов и пищевой ценности) – это обеспечило удлинённые сроки их качественных хранений;

- испытания таких обдувов выдали сроки качественных хранений сельхозпродуктов до 45 дней.

4. Новый метод **интегральной** диагностики ВЧИ приборов с помощью 26-ти контрольных индикаторов в линии их электропитания без разряда и при его горении (ток индуктора измерен в крайних точках этой линии); они определяют: 1) повышение энергоэффективности ВЧИ приборов с помощью его энергобаланса (определён сопротивлениями  $R_1-R_5$  согласно закону Ома) и 2) оценки паразитных утечек ВЧ мощности по разностям тока в линии электропитания индуктора;

- в моём приборе ч. 1-я была определена понижением вихревых токов в ферритовом сердечнике плоского индуктора и в зоне ГРК около этого

индуктора, а ч. 2-я отсутствовала в моём приборе (такие паразитные утечки ВЧ мощности были найдены в ВЧИИ RIM-20 с цилиндрическим индуктором в вакууме) [А3].

5. Новый метод ликвидации понижений результатов **локальной** зондовой диагностики плазмы ближайшими зондодержателями цилиндрических зондов Ленгмюра путём измерений концентраций электронов  $n_e$  с зондовыми нитями различных длин [32];

- измерения  $n_e$  зондом-1 с зондодержателем  $\varnothing$  1,6 мм (это его опорный зонд) и с нитями длин 3, 5 и 10 мм ( $\varnothing$  0,15 мм) показали, что нити длин от 7 до 10 мм надёжно устраняли понижение измерений  $n_e$ ; в этой связи нити длин 10 мм были использованы в обоих цилиндрических зондах; этот метод позволяет устранять названные понижения результатов измерений цилиндрическими зондами Ленгмюра.

6. Новый метод оценки физического состояния плазмы около неизолированных защитных экранов зондов в виде отношений её ФРЭЭ к функциям Максвелла: они представлены близкими к ним отношениями измеренных локальных плотностей электронного тока насыщения на зонд  $j_{esИ}$  к таким же расчётным параметрам по классической формуле Максвелла  $j_{esМ} = (1/4)en_e(8eT_e/\pi m_e)^{1/2}$  при их обозначении символом  $R_M = j_{esИ}/j_{esМ}$  [А6];

- погрешности измерений плотностей электронного тока насыщения на зонд-1  $\sim \pm 10\%$  выдали его символ  $R_{M1} \sim (0,7-0,9)\pm 20\%$  – таково понижение состояния плазмы около этого зонда.

7. Новые метод и устройство повышения точности **локальной** диагностики плазмы основным зондом-1 с неизолированным защитным экраном  $1 \neq 0$  и со спец.позицией А, где экран  $1=0$ , в которую вводится зонд-2 таких же размеров с экраном  $2 \neq 0$ ; объединение отношений данных обоих зондов  $(x_2/x_1)(R_M)$  в спец.позиции А и радиальных зависимостей символа  $R_{M1}(r)$  зонда-1 при исключении этого символа  $R_M$  выдали понижения параметров плазмы его экраном  $1$  от 2% до 28%; это уточнило одиночную диагностику

зонда-1 и определило символ  $R_M \sim 0,9 \pm 20\%$ , показавший близость изучаемой плазмы к максвелловской среде (при  $P_{in} \geq 100$  Вт);

- этот метод уточняет данные зондов Ленгмюра с неизолированными защитными экранами, а уточнённый символ  $R_M$  определяет состояние плазмы при отсутствии в ней зондов с такими защитными экранами [А8].

8. Новое количественное физическое явление короткозамкнутого двойного макро-зонда в неизолированном защитном экране цилиндрического зонда-1 было чётко определено зондом-1 и зондом-2 в спец.позиции А: они совместно измерили понижения параметров плазмы от 2% до 28%, возникшие в одиночной диагностике зонда-1 (показано в предыдущем пункте – 2017 г.);

- догадка о нём возникла у меня в 1986 г. в виде физической идеи – она помогла мне улучшить плазмохимию на кремниевых пластинах [ИЗ], а в 2006 г. это качественное физическое явление было найдено мною в металлическом теле под плавающим потенциалом в плазме электродугового разряда постоянного тока [51].

9. Новый метод локальной диагностики максвелловской плазмы цилиндрическими зондами Ленгмюра, определяющий, кроме их стандартных данных, коэффициент Бома, толщины зондовых слоёв и среднюю массу ионов путём совместных решений уравнения «закон 3/2» и уравнения Бома в специальной (с известной  $M_i$ ) и общей стадиях экспериментов для двух моделей зондового слоя [А16];

- в специальном эксперименте с изучаемой ксеноновой плазмой при  $\Delta V_f < \varepsilon_m/e$  (и с  $R_M \sim 0,9 \pm 20\%$  – это её близость к максвелловской среде) данные зонда-1 определили два коэффициента Бома: формальный 0,62 ЧЛБ модели и реальный 0,745 СФ модели; согласно графическому методу получения этих коэффициентов их погрешность составила  $\sim \pm 15\%$ ; в общем эксперименте при  $\Delta V_f > \varepsilon_m/e$  имеем ЧЛБ модель и формальный  $C_{БЧЛБ} = 0,62$ , который решением системы уравнений (1)-(2) оценит формальные  $x_{ЧЛБ}$  и  $M_i$ , а при  $\Delta V_f < \varepsilon_m/e$  имеем СФ модель и реальный  $C_{БСФ} = 0,745$ , который решением

системы уравнений (1)-(2) вначале выдаст формальные  $x_{чЛБ}$ , затем через зависимость  $x_{сФ}=f(x_{чЛБ})$  они определяют реальные  $x_{сФ}$ , и далее уравнение Бома (2) выдаст реальную  $M_i$ .

10. Новые метод и устройство упрощённой оценки **локальной** плотности ионного тока на эмиссионный электрод ИОС ВЧИИ имитатором плоского пристеночного зонда-3 в торце радиально подвижного керамического стержня [А12]; при этом плавающем потенциале плоский зонд-3 ~ в 2 раза понижал плотности ионного тока на зонд-1, а испытание модели ВЧИИ-10 показало, что данные зонда-3 должны были понизиться ~ в 2,5 раза (глубже на 25%); это отличие инженерного характера возникло из-за сравнительно небольшого торца керамического стержня  $\varnothing 5$  мм с плоским зондом-3  $\varnothing 1,5$  мм при несимметричном окружении его этой керамикой;

- погрешности измерений зондом-3 составляли ~  $\pm 15\%$ , а упрощённая конструкции предложенного имитатора облегчила и ускорила реализацию такой оценки.

### Достоверность результатов

Подтверждена измерением прямым весовым способом с погрешностью ~  $\pm 3$  % резко пониженной удельной эрозии анодов высокоресурсных электродуговых приборов постоянного тока двух видов [А21]. Количественные результаты измерений средней проводимости аргоновой плазмы в анодном канале высокоресурсного электродугового прибора постоянного тока Т-плазматрона при атмосферном давлении аргона были получены модифицированным методом ВАХ на основании известных литературных данных о свободно горящей дуге при атмосферном давлении аргона [А22]. Средняя проводимость аргоновой плазмы в стабилизирующем канале электродугового прибора постоянного, измеренная ВЧ индукционным контурным методом, была оценена надёжным стандартным методом ВАХ с помощью дополнительных изолированных водоохлаждаемых секций [А2]. Точное согласование ВЧ генератора с его нагрузкой обеспечило чистую активность линии электропитания ВЧИ разряда и надёжность определения

по закону Ома детального баланса ВЧ мощности в изучаемой модели при проведении её интегральной электротехнической диагностики [А3]. Влияние порядка  $-1\%$  ближайшего зондодержателя диаметра 1,6 мм на измерения параметров плазмы одиночным цилиндрическим зондом диаметра 0,15 мм и длины 10 мм [32] было обеспечено средними ошибками измерений зондовой станцией VGPS12 порядка  $\pm 10\%$ , определёнными в Принстонском университете США, где ФРЭЭ ксеноновой плазмы измерялись двумя независимыми методами диагностики – контактным зондом Ленгмюра со станцией VGPS и бесконтактным оптическим эмиссионно-спектральным прибором. Результаты специальных измерений в плазме, относительно близкой к максвелловской среде, условно применённых в виде эксперимента общего характера с коэффициентом Бома 0,745 для ступенчато-фронтальной модели зондового слоя, подтверждены арифметическим определением массы ионов ксенона по формуле Бома: эта масса оказалась вполне достаточно близка к её табличному значению. Оценка плотности ионного тока на эмиссионный электрод ИОС имитатором плоского пристеночного зонда [А12] была подтверждена измерением такого же параметра с инженерной точностью  $+30\%$  в эксперименте с генерацией клиновидного ионного пучка в модели ВЧИИ-10 [А19].

### **Вопросы авторства и публикаций**

В диссертации приведены результаты, полученные непосредственно автором, под его руководством или при его активном участии. Результаты его исследований были опубликованы в работах [А1-А25, Б1-Б12, И1-И14], приведённых отдельным списком в конце диссертации. В разработке конструкций экспериментальных образцов автору принадлежали идеи; совместно с соавторами разрабатывались пути их изготовления; все образцы изготовлены под его руководством и часть из них – с его участием. Автором лично планировались эксперименты, разрабатывались измерительные системы, методики измерений и проводилось большинство измерений. В работах [А2, А3, А5-А8, А11, А12-А17], выполненных под руководством

автора, ему принадлежит участие в постановках задач и обсуждении промежуточных результатов. В работах [A18, И1, И2, И5-И9, И13, И14] автору принадлежат идеи практической реализации экспериментов, с его участием разрабатывались методы изготовления экспериментальных образцов, им разработана и изготовлена измерительная система и проведены измерения. В работах [A2, A12, И13] совместно с соавторами разрабатывались технологии изготовления образцов и обсуждались полученные результаты.

### **Апробация работы**

Основные научные результаты работы докладывались на российских и международных научных мероприятиях, в том числе:

- 1) Международный симпозиум по сухим технологическим процессам (Корея, г. Чеджу, 2005);
- 2) 6-й Семинар Корея-Китай по энергетическим технологиям (Корея, г. Бусан, 2006);
- 3) 16-й Международный симпозиум по применению плазменных процессов (Словакия, г. Подбанск, 2007);
- 4) 36-я Международная конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (М.О., г. Звенигород, 2009);
- 5) 16-й Международный летний симпозиум по вакуумным электронным и ионным технологиям (Болгария, г. Солнечный Берег, 2009);
- 6) 15-й Международный конгресс двигателестроителей (Крым, пос. Рыбачье, 2010);
- 7) Всероссийская конференция по физике низкотемпературной плазмы (г. Казань, 2014);
- 8) 24-я Международная конференция по радиационной физике твёрдого тела (Крым, г. Севастополь, 2014);
- 9) 6-й Международный семинар и летняя школа по физике плазмы (Болгария, г. Китен, 2014);

- 10) 34-я Международная конференция по электроракетным двигателям (Япония, г. Кобе, 2015);
- 11) 5-я Международная конференция по космическим электроракетным двигателям (Италия, г. Рим, 2016);
- 12) 20-я Международная конференция по явлениям в ионизованных газах (Италия, Пиза, 1991);
- 13) 11-я Международная конференция по газовым разрядам и их применениям (Япония, Токио, 1995);
- 14) 26-я Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (М.О., г. Звенигород, 1999);
- 15) Международная конференция по передовым технологиям (Корея, г. Чеджу, 2006);
- 16) Международная конференция по плазменным технологиям (г. Казань, 2012);
- 17) 37-й Академический королевский симпозиум по космонавтике «Актуальные проблемы российской космонавтики» (Москва, 2013);
- 18) 21-й Международный симпозиум по плазмохимии (Австралия, г. Кэрнс, 2013);
- 19) 19-я Международная конференция по газовым разрядам и их применениям (Китай, г. Пекин, 2012);
- 20) 16-я Международная конференция по источникам ионов (США, г. Нью-Йорк, 2015);
- 21) 12-й Международный семинар по электрическим зондам в замагниченной плазме (Словения, деревня Накло, 2017);
- 22) 5-я Международная конференция по плазмохимии и плазменным процессам (Париж, 2017);
- 23) 10-я Конференция по современным средствам диагностики плазмы (Москва, московский инженерно-физический институт, 2016);
- 24) Приглашённый доклад на Международной конференции по физике плазмы (г. Дубровник, Хорватия, 2018);

25) 22-я Международная конференция по газовым разрядам и их применениям (Сербия, 2018);

26) 10-я Всероссийская конференция «Необратимые процессы в природе и технике», Московский государственный технический университет (МГТУ) им. Н.Э. Баумана, 2019.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка цитированной литературы. В конце диссертации представлены основные результаты. Полный объём диссертации составляет 256 страниц, включая 134 рисунка, 2 таблицы и список литературы из 114 наименований.

### **Основное содержание работы**

Во **Введении** обосновывается актуальность темы, описываются цели и задачи исследования, формулируются научная новизна результатов, методология и методы диссертационного исследования, объект и предмет исследования, научная и практическая значимость работы, основные положения, выносимые на защиту, достоверность результатов, вопросы авторства и публикаций, апробация работы, а также структура и объём диссертации.

**Первая глава** посвящена обзору современного развития интегральной и локальной диагностики плазменных приборов. Упомянуты электротехнические измерения в этих приборах, а также спектральные, лазерные и сверхчастотные измерения в плазме при выполнении интегральной и локальной диагностики этих устройств. В отношении локальной диагностики описано современное состояние зондовых измерений параметров плазмы методом Дрювестейна, позволяющим с вполне приемлемой точностью регистрировать в плазме низкого давления ФРЭЭ, температуры электронов  $T_e$ , их концентрации  $n_e$ , потенциалы пространства  $V_s$  и плотность электронного тока насыщения на зонд  $j_{es}$  при потенциале пространства  $V_s$ . Данное состояние диагностики экспериментальных плазменных приборов стимулировало её дальнейшее развитие в части

интегральных и локальных методов, разработанных и экспериментально апробированных в настоящей диссертации.

Во **второй главе** описаны конструкции и два новых метода интегральной диагностики электродуговых приборов постоянного тока: Т-плазматрона и А-плазматрона. Вначале разрабатывался Т-плазматрон, конструктивная схема которого представлены на рис. 1.

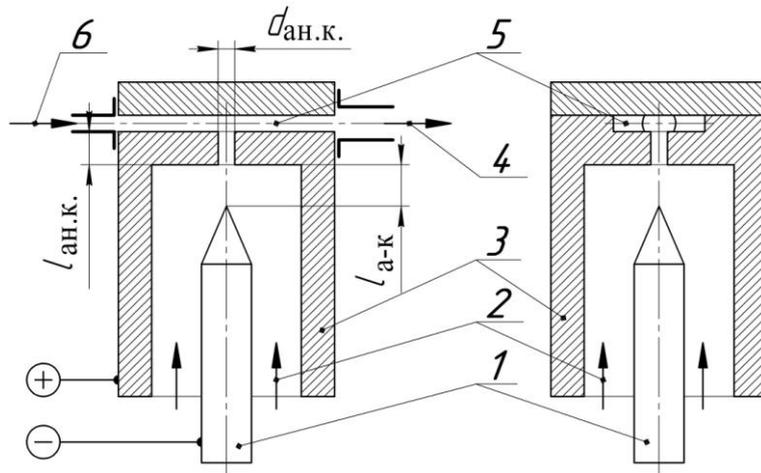


Рис. 1. Конструктивная схема Т-плазматрона

1- горячий вольфрамовый катод, 2- подача аргона, 3- медный водоохлаждаемый анод, 4- истекающий поток плазмы, 5- плоский канал подачи технологического газа, 6- подача технологического газа

Он является электродуговым прибором постоянного тока с горячим стержневым вольфрамовым катодом 1 и водоохлаждаемым сопловым анодом 3 при защитном обдуве аргоном его катода. Сочетание анодного и технологического (5) каналов напоминает букву Т, поэтому данный источник плазмы получил название «Т-плазматрон». В области соединения анодного канала с плоским технологическим каналом 5 образовывалась вихревая зона, которая создала распределённую анодную привязку, резко уменьшившую плотность тока дуги. Удельная эрозия анода Т-плазматрона определялась прямым весовым способом с погрешностью около 3%. Она достигла уровня  $10^{-10}$  г/Кл, который понизился в 10 000 раз относительно анодной эрозии традиционных электродуговых приборов постоянного тока с контрагированной анодной привязкой, составлявшей величину порядка  $10^{-6}$  г/Кл. В итоге плазменная струя Т-плазматрона стала практически

спектрально чистой с небольшой примесью вольфрамового пара (удельная эрозия горячего вольфрамового катода составляет примерно  $10^{-9}$  г/Кл) при техническом ресурсе этого прибора, который поднялся от  $10^0$  до  $10^4$  час. (порядка 1 года).

Улучшенное качество генерируемой плазмы стимулировало испытание Т-плазматрона проведением с его помощью плазмохимических процессов. В этих экспериментах применялись технологические газы трёх видов при расходе аргона 2 л/мин. и при расходах технологических газов 3 л/мин, создававших суммарный “вентиляционный” расход 5 л/мин. при давлении плазмы, равном давлению окружающей среды:

- 1) воздух+дизельное топливо при атмосферном давлении образовал слабо ионизованный синтез-газ ( $\text{CO}+\text{H}_2$ ), который был подан на вход дизельного двигателя и очистил его выхлоп ~ на 10% (оказалась не слишком высока);
- 2) кислород в форвакууме обеспечил скорость удаления фоторезиста ~ 1,3 мкм/мин.;
- 3) хладон  $\text{CF}_4$  в форвакууме обеспечил скорость травления Si ~1 мкм/мин.

Эти процессы травления представляли некоторый интерес, поэтому Т-плазматрон мог быть использован для обеспечения вспомогательных процессов при любых полупроводниковых производствах (очистка подложкодержателей, стенок вакуумных камер и пр.).

В ходе испытаний Т-плазматрона оказалось, что при удлинении его анодного канала запуск дуги приводил к свободно горящему дуговому разряду в аргоне с контрагированной дуговой привязкой к внутренней поверхности анода при атмосферном давлении. Оказалось, что для разряда такого вида были известны в литературе величины анодного скачка потенциала. На этой основе регистрировались ВАХ разрядов с распределёнными и контрагированными анодными привязками при одинаковых внутренних межэлектродных расстояниях, что позволило для одинаковых величин тока дуги вычитать анодные скачки потенциала от ВАХ свободно горящей дуги, и это определяло напряжение в межэлектродном пространстве для второй ВАХ дугового разряда с распределённым анодным пятном. Их вычитание из этой второй ВАХ определяло разности потенциалов

в анодном канале, поскольку было известно, что в распределённых анодных пятнах дуги анодные скачки потенциалов были весьма малы. Эти разности напряжения в анодном канале определяли напряжённость электрического поля в нём с последующим вычислением средних величин проводимости плазмы в этом канале. Такая возможность оказалась интегральной диагностикой Т-плазматрона в виде модифицированного метода ВАХ определения средней проводимости дуговой плазмы в анодном канале [А22].

Дальнейшая доработка конструкции данного электродугового прибора постоянного тока была проведена с целью изменить форму распределённой анодной привязки: если в Т-плазматроне эта дуговая привязка находилась сбоку от среза анода в виде изогнутой петли, то в приборе, названном А-плазматроном, она оказалась кольцевой и симметричной относительно оси плазматрона (отсюда буква А в названии из-за термина “axial” – английского слова “ось”). Газоразрядный узел А-плазматрона точно такой же, как и в Т-плазматроне, поэтому испытанный в Т-плазматроне модифицированный метод ВАХ измерения средней проводимости плазмы в анодном канале является новой интегральной диагностикой № 1 для обоих электродуговых приборов постоянного тока.

Конструктивная схема А-плазматрона представлена на рис. 2, а на рис. 3 показан вариант его конструкции.

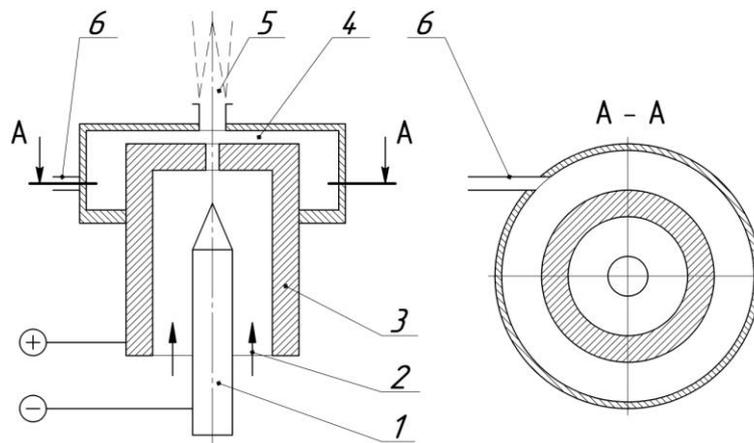


Рис. 2. Конструктивная схема А-плазматрона

1- вольфрамовый катод, 2- подача аргона, 3- медный водоохлаждаемый анод, 4- плоский канал подачи технологического газа, например, воздуха, 6- патрубок подачи технологического газа

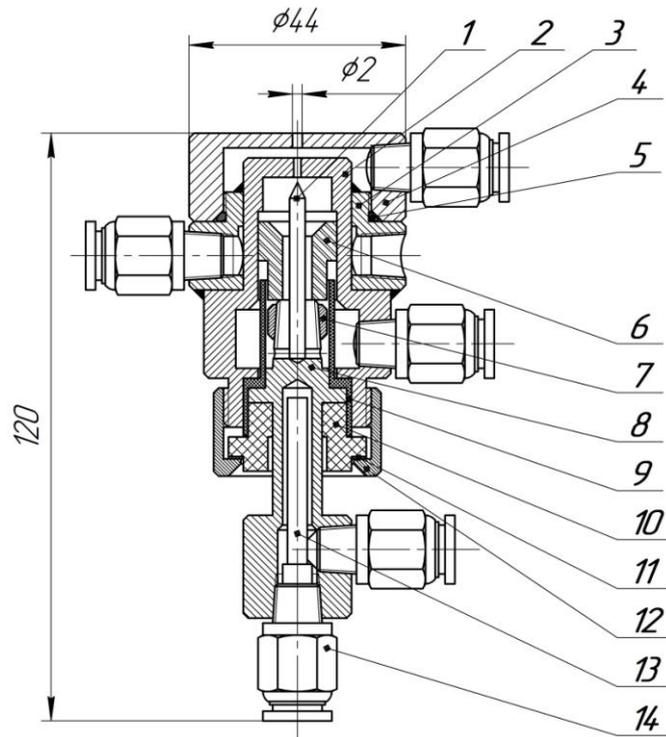


Рис. 3. Вариант конструкции А-плазматрона  
 1- вольфрамовый катод, 2- медный охлаждаемый анод, 4- дополнительная деталь анода, создающая вихревое распределение его анодной привязки

После изготовления данного прибора было проведено измерение его ВАХ и удельной эрозии анода, которая сохранила уровень  $10^{-10}$  г/Кл, аналогичный Т-плазматрону (измерена таким же прямым весовым способом с погрешностью 3%). Технологические испытания А-плазматрона показали более высокое качество технологических процессов, проводившихся с помощью Т-плазматрона:

- 1) очистка выхлопа дизельного двигателя выросла от 10 до 30%,
- 2) скорость удаления фоторезиста поднялась от 1,3 до 3,5 мкм/мин,
- 3) скорость травления кремния увеличилась от 1 до 3 мкм/мин.

Таким образом, степень активации технологического газа в А-плазматроне выросла примерно в 3 раза. При использовании в нём воздуха атмосферного давления в качестве технологического газа в его плазменной струе были определены высокие концентрации радикалов NO и OH, которые весьма полезны для биомедицины – это диагностический вывод моих коллег – сотрудников физического и биологического факультетов МГУ. Такой технологический газ А-плазматрона очень активно воздействовал на

сельхозпродукты, повышая сроки их хранения. Данный способ был запатентован по заявке 2019 г., а его сущность представила интересный новый метод интегральной диагностики этого высокоресурсного электродугового плазматрона измерением срока хранения сельхозпродуктов, обдуваемых его биомедицинской воздушной плазмой атмосферного давления, поддерживающей товарный вид и пищевую ценность этих продуктов (погрешность этой диагностики составила  $\sim \pm 15$  мин.).

При необходимости повысить температуру плазмы в Т- и А-плазматронах требовалось повысить их мощность. Для этого желательно увеличить длину положительного столба его дуги с помощью межэлектродного стабилизирующего канала, который повысит напряжение дугового разряда при сохранённом уровне тока дуги, чтобы не уменьшать спектральную чистоту генерируемой в них плазмы и величину их технического ресурса. Обычно стабилизирующий канал дугового разряда создаётся в виде набора электронейтральных и водоохлаждаемых медных секций, что продемонстрировано конструктивной схемой, представленной на рис. 4 для А-плазматрона – электродугового прибора постоянного тока с повышенным уровнем его технологических параметров.

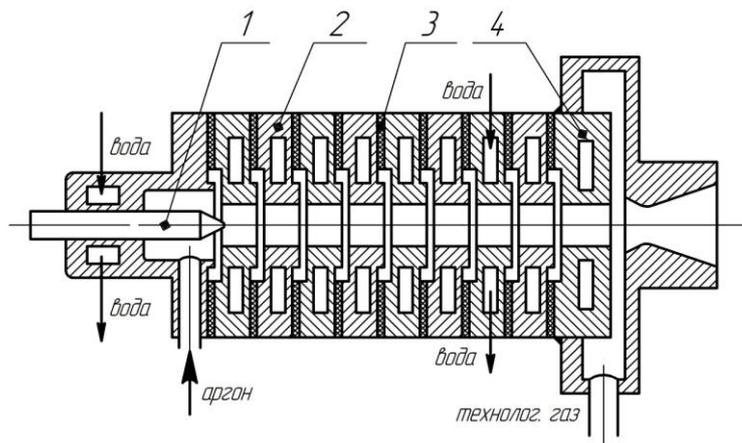


Рис. 4. Конструктивная схема А-плазматрона со стабилизирующим каналом  
 1- стержневой вольфрамовый катод с водоохлаждаемой заделкой, 2- водоохлаждаемая медная секция стабилизирующего канала, 3- герметизирующая диэлектрическая прокладка, 4- водоохлаждаемый медный анод,

Использование такой его конструкции позволяет измерять среднюю проводимость плазмы в стабилизирующем канале с помощью стандартного метода ВАХ, для которого определяется напряжённость электрического поля измерением разности потенциалов электронейтральных секций стабилизирующего канала, которую нужно поделить на расстояние между их одинаковыми торцами или между центральными точками в их поверхностях, контактирующих с плазмой. Этот параметр определяется вместе с током дуги, что позволяет определить среднюю проводимость плазмы по закону Ома.

Подобный электродуговой прибор, использовавший горячий стержневой катод, межэлектродный стабилизирующий канал и сопловой анод с контрагированной анодной привязкой, был создан в МАИ в 1959 г. в виде модели плазменного двигателя, в котором проводилось такое же измерение средней проводимости плазмы в данном канале стандартным методом ВАХ.

В 1963 г. мной было получено задание организовать измерение данного параметра плазмы ВЧ контурным методом. Для этого в стабилизирующем канале данного прибора наряду с медными электроизолированными секциями была установлена кварцевая водоохлаждаемая секция, охваченная катушкой индуктивности. Её добротность графически измерялась прибором ИЧХ-57 при наличии плазмы в стабилизирующем канале и при её отсутствии. Для организации ВЧ контурного метода диссертантом была выведена формула для средней проводимости плазмы в стабилизирующем канале с использованием измерений добротности катушки индуктивности применительно к уровню проводимости плазмы до 50 Мо/см и при слабом в ней скин-эффекте на основе моей аппроксимации цифровых табличных параметров такой катушки, имевшихся в монографии Родигина Н.М. Поскольку данный ВЧ контурный метод и стандартный метод ВАХ определяли одну и ту же среднюю проводимость плазмы в стабилизирующем канале, обе формулы этих методов были сопоставлены и определили средний радиус потока проводящего газа, меньший геометрического радиуса этого канала. Таким образом, данный метод интегральной диагностики определил

среднюю толщину непроводящего погранслоя в стабилизирующем канале и уточнил среднюю величину повышенной проводимости плазмы, явно расширив и обогатив этот новый метод интегральной диагностики [А2].

Данная диагностика была апробирована в упомянутой модели плазменного двигателя с традиционной контрагированной анодной привязкой дуги. Такая диагностика вполне применима и в обоих изучавшихся плазматронах со стабилизирующими электродуговыми каналами, поэтому её можно считать интегральной диагностикой № 2 для обоих видов этих плазматронов.

Итак, выводы для А-плазматрона: 1) в А-плазматроне с газоразрядным узлом, аналогичным Т-плазматрону, применим описанный выше модифицированный метод ВАХ измерения проводимости плазмы в его анодном канале; 2) А-плазматрон может использоваться для быстрого заживления человеческих ран и очистки сельхозпродуктов, удлинняя сроки их хранения (на второй способ подана патентная заявка, по которой принято решение о выдаче патента [И10]); 3) прямолинейная форма А-плазматрона с ресурсом ~ 1 года допускает его использование в качестве плазменного двигателя.

**Третья глава** диссертации посвящена интегральной и локальной диагностике ВЧИ прибора.

**3.1** Вначале дано описание изучаемого лабораторного ВЧИ устройства с плоским индуктором и ферритовым сердечником, размещёнными в атмосферных условиях на кварцевом торце металлической ГРК. Принципиальная схема данного прибора представлена на рис. 5.

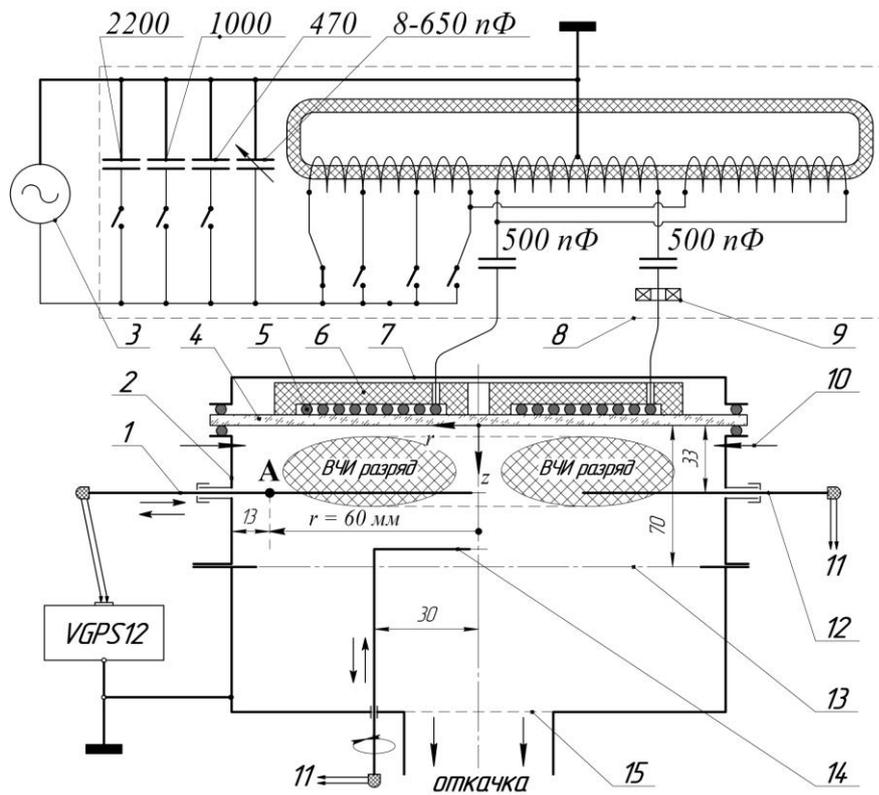


Рис. 5. Принципиальная схема лабораторного ВЧИ прибора  
 1- главный прямой, радиально подвижный зонд-1, 2- вакуумная камера из нержавеющей стали, 3- ВЧ генератор, 5- плоский индуктор, 6- ферритовый сердечник, 8- трансформаторное согласующее устройство, 11- зонд-3 (имитатор плоского пристеночного зонда), 13- зона расположения ионно-оптической системы (ИОС) ионного источника, 14- Г-образный зонд-2

Его конструкция показана на рис. 6. Здесь более чётко видна организация зондовой диагностики в данном устройстве.

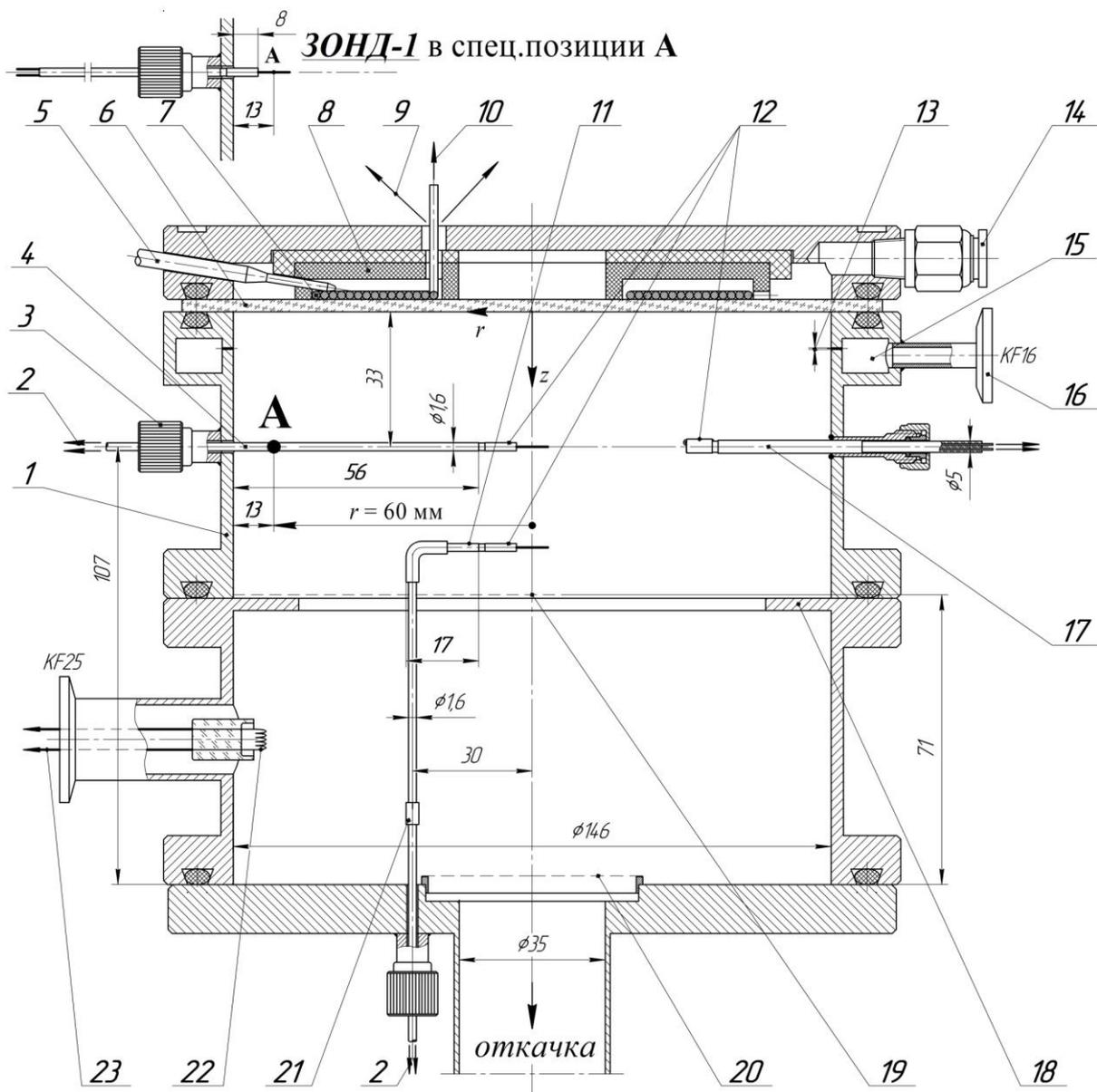


Рис. 6 Сборочный чертёж лабораторного ВЧИ прибора

1- газоразрядная секция модели, 2- к зондовой станции VGPS12, 3- подвижный вакуумный гермоввод UltraTorr 1/16", 4- радиально подвижный, прямой цилиндрический **зонд-1**, 5- термодатчик, 6- кварцевое окно 5 мм толщины, 7- индуктор, 8- ферритовый сердечник индуктора, 9- выход охлаждающего воздуха, 10- к СУ, 11- Г-образный цилиндрический **зонд-2**, 12- опорные зонды, 13- 8 равномерно расположенных отверстий диаметра 0.4 мм для подачи ксенона, 14- штуцер "one-touch" подачи охлаждающего воздуха, 15- кольцевой коллектор подачи ксенона, 16- разъем патрубка подачи ксенона, 17- плоский имитатор пристеночного **зонда-3**, 18- фланцевый выступ для крепления ИОС, 19- нижняя позиция Г-образного зонда-2, 20- сетка с газодинамическим сопротивлением ИОС, 21- металлическая втулка, соединявшая две части экрана **зонда-2**, 22- вольфрамовая нить вскрытой галогенной лампы, 23- к электронному трансформатору питания галогенной лампы; А- специальная позиция обоих зондов (показанная также на рис. 5)

Видно, что основной прямой зонд-1 измеряет плазму в среднем сечении ГРК, имея специальную позицию А, в которой длина его защитного экрана достигает нуля; дополнительный Г-образный зонд-2, вертикальная ось которого введена в средне-радиальную позицию зонда-1, при вращении вокруг этой оси способен повторить измерения зонда-1, включая специальную позицию А, и далее измерить продольные распределения параметров плазмы во всей половине ГРК, расположенной перед зоной установки ИОС; зонд-3 – имитатор плоского пристеночного зонда.

### 3.2 Два вида интегральной диагностики изучаемого ВЧИ прибора.

**3.2а** Этот раздел содержит описание запатентованного метода интегральной электротехнической диагностики ВЧИ устройств, включающего измерения детальных распределений потерь ВЧ мощности на линии электропитания ВЧИ разряда при точном согласовании ВЧ генератора (ВЧГ) с нагрузкой [А3]. Измерение тока индуктора непосредственно в его проводнике и на выходе ВЧ генератора позволяет определить паразитные утечки ВЧ мощности на любых элементах этой линии. Данная методика определяет 26 элементов линии электропитания, которые составляют 3 группы конструктивных, операционных и конструктивно-операционных индикаторов. Ещё до включения ВЧГ измеряется активное сопротивление индуктора в свободном пространстве и в собранном виде в ВЧИ приборе, что определяет сопротивление индуктора  $R_1$  и вихревых токов  $R_2$  в ВЧИ приборе. Далее измеряется ток индуктора без разряда  $I_0$ , определяющий сопротивление линии электропитания без разряда  $R_3$  через сопротивление нагрузки  $R_{н0}$  без разряда, и ток индуктора при горении разряда  $I$ , который определяет сопротивление нагрузки  $R_n$  с разрядом, КПД передачи мощности от ВЧГ в плазму  $\eta_{гп}=1-(I/I_0)^2$  и величины эквивалентного сопротивления плазмы  $R_4$ . Для определения баланса ВЧ мощности в ВЧИ приборе вначале находим сумму электрических сопротивлений в линии его электропитания  $R_n=R_1+R_2+R_3+R_4$ . Затем можем умножить такое равенство на  $I^2$  и получить баланс ВЧ мощности в изучаемом приборе при любых величинах падающей мощности ВЧГ. В качестве примера представляем энергобаланс при

падающей ВЧ мощности генератора  $P_{in}=150$  Вт с его распределением в виде % (ток индуктора  $I=2,95$  А;  $17,24 \text{ Ом}=14,9 \text{ Ом}+1,37 \text{ Ом}+0,73 \text{ Ом}+0,24 \text{ Ом}$ ):

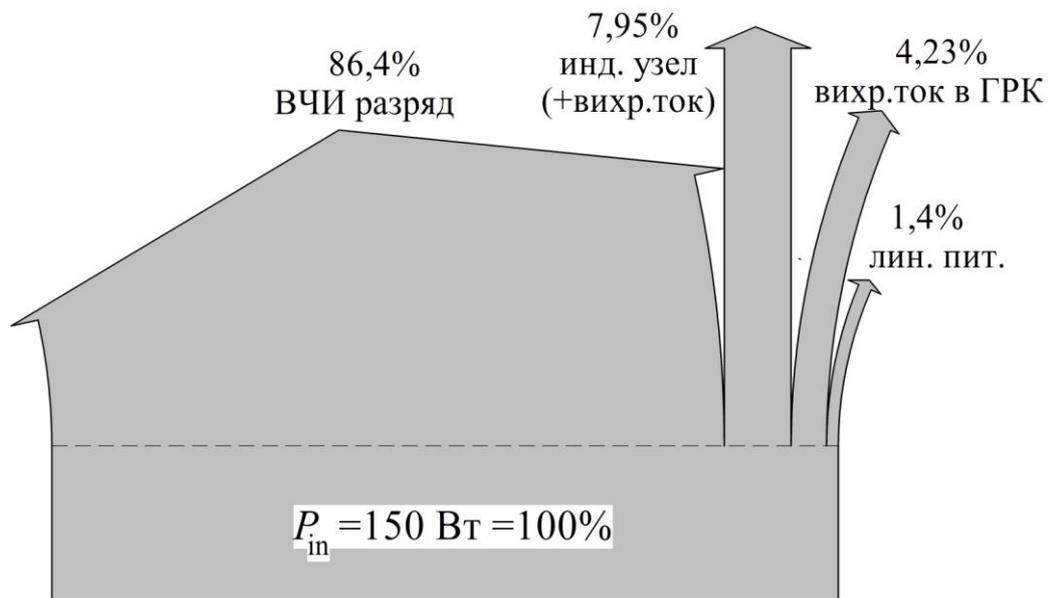


Рис. 7 Баланс ВЧ мощности в изучаемом ВЧИ приборе

Его энергоэффективность оказалась достаточно высокой, а содержание энергодобаланса выявило возможности повышения энергоэффективности изучаемого ВЧИ прибора в виде уменьшений вихревых токов в ферритовом сердечнике индуктора и в ГРК вблизи индуктора, если такие возможности удастся реализовать.

В качестве примера использования данной методики описана интегральная электротехническая диагностика технологического варианта ВЧИИ RIM-20 [А3]. Причиной послужило вакуумное размещение ГРК и индуктора при расположении в атмосфере его ВЧ генератора и согласующего устройства. Благодаря детальным измерениям баланса ВЧ мощности с помощью данного метода интегральной диагностики и измерению тока индуктора в двух точках линии его электропитания (на выходе ВЧГ и около индуктора) удалось выявить паразитные утечки ВЧ мощности при отсутствии ВЧИ разряда, которые превысили ток индуктора примерно на 4%. Точность измерений такого тока с погрешностью  $\sim \pm 50\%$  была невелика, но эти утечки расширили набор деталей энергодобаланса изучавшегося ВЧИ прибора, показав интересные его элементы. Возможные причины их

возникновений – появление токов в вакуумных гермовводах линии электропитания и в вакуумной камере между индуктором и заземлёнными деталями конструкции.

**3.2б** В качестве второго вида интегральной диагностики измерялось давление плазмы, что без затруднений выполнялось в металлической ГРК. Датчик Varatron, позволявший измерять давление в ГРК без разряда и при его горении, выяснил, что при поджиге ВЧИ разряда давление в камере не возрастало. Этот результат показал, что степень ионизации изучаемой ксеноновой плазмы была низка. Данный вывод был подтверждён в дальнейшем результатами локальной диагностики плазмы в ГРК, согласно которой её степень ионизации находилась на уровне  $\sim 1\%$ .

**3.3** Далее описана локальная диагностика ВЧИ прибора. Вначале показана организация зондовой диагностики плазмы ВЧИ прибора с помощью автоматизированной зондовой станции VGPS12 между средним сечением ГРК и зоной размещения ИОС. На рис. 5 и 6 показаны использованные в данной работе два одиночных цилиндрических зонда: один прямой радиально подвижный зонд-1, введённый в вакуумную камеру в среднем сечении ГРК, и другой – дополнительный Г-образный зонд-2, введённый через нижнее днище вакуумной камеры в средне-радиальной позиции зонда-1. Вначале описана организация зондовой диагностики с использованием зондовой станции VGPS12, а затем представлены методы зондовой диагностики ВЧИ плазмы, применявшиеся до написания настоящей работы, а также и их результаты. Они содержат стандартный набор зондовых параметров ВЧИ установок в виде ФРЭЭ,  $T_e$ ,  $n_e$ , потенциала пространства  $V_s$  и плотности электронного тока насыщения на зонд  $j_{es}$  в достаточно широком диапазоне давлений. Использовались одиночные цилиндрические зонды размерностей, вполне приемлемых для получения качественных результатов измерений. Отсюда ясно, что диагностика настоящей работы достаточно чётко дополняет эту локальную диагностику.

**3.3а** Далее представлено описание метода устранения влияния ближайшего зондодержателя на результаты измерений. Были проведены измерения зондом-1 концентрации электронов  $n_e$  при использовании

вольфрамовых нитей диаметра 0,15 мм при их длинах 3–10 мм с ближайшим зондодержателем диаметра 1,6 мм. Измерения показали, что при удлинении зондов величины найденных  $n_e$  возрастали, переходя к насыщению, как показано на рис. 8.

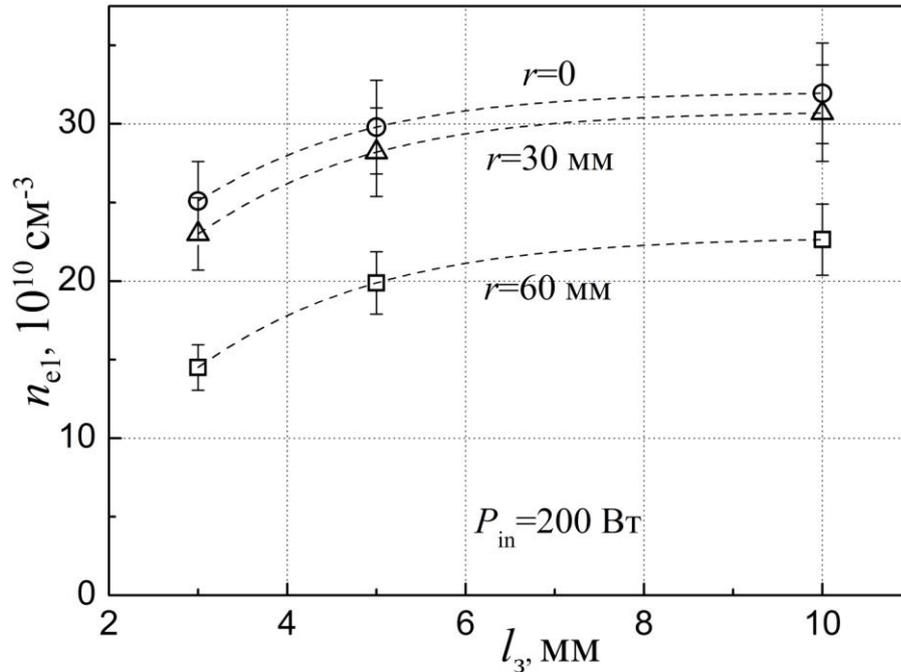


Рис. 8 Измерения  $n_e$  зондом-1 с вольфрамовыми нитями разных длин

Стало ясно, что при длинах измерительных линий 7–10 мм влияние рекомбинации заряженных частиц на ближайшем зондодержателе практически отсутствовало. Представляя эту зависимость в безразмерной форме с нормированной длиной зондов  $L_3=0,4(a/b^2)l_3$  (отношение собирающей поверхности зонда к поверхности зондодержателя длины, равной его диаметру  $2b$ ), было выяснено, что при  $L_3 \geq 0,4$  влияние зондодержателя диаметра  $2b$  было мало. На этой основе при использовании выражения для  $L_3$  можно оценивать зондовые измерения в любых других экспериментах. Реализация данного способа определила приемлемые размерности обоих зондов:  $l_3=10$  мм при диаметрах нитей 0,15 мм и зондодержателя 1,6 мм. При этом понижение измеряемых параметров плазмы под влиянием данного зондодержателя должно быть достаточно приемлемым – в пределах –1%.

**3.3б** При указанных измерительных размерностях с помощью зонда-1 были проведены аккуратные измерения радиальных распределений параметров ксеноновой плазмы в среднем сечении ГРК, а зондом-2 с несколько меньшей аккуратностью были вторично измерены данные зонда-1 в среднем сечении ГРК и проведена регистрация пространственных распределений параметров плазмы в ГРК между его средним сечением и зоной размещения ИОС. Эти распределения параметров плазмы показаны для осевой, средне-радиальной и пристеночной позиций. Оказалось, что данные параметры плазмы мало изменялись в продольном направлении измерений и, как правило, заметно различались с данными зонда-1 в среднем сечении ГРК, причём, эти различия были особенно велики в пристеночной позиции А при  $r=60$  мм, показанной на рис. 5 и 6, где данные зонда-2 оказались заметно понижены против результатов зонда-1.

Вначале для их оценки была определена средняя толщина скин-слоя в ВЧ магнитном поле индуктора. Этот эффект был аномальным из-за бесстолкновительного характера плазмы (средняя длина свободного пробега электронов порядка составила  $\sim 140$  мм в ГРК диаметра 146 мм). В этих условиях проводимость плазмы тоже была аномальной. Толщина данного скин-слоя оказалась порядка 1,3 см, что свидетельствовало о протекании токов ВЧИ разряда в верхней части верхней половины ГРК около индуктора. В этой связи в нижней половине ГРК перед ИОС, находившейся на расстоянии 7 см от индуктора, где проводилась зондовая диагностика, токи ВЧИ разряда отсутствовали. При этом ФРЭЭ в изучаемой плазме была изотропна.

**3.3в** Занижения данных зонда-2 с неизолированным экраном по сравнению с результатами зонда-1 без экрана возбудили идею об искажениях состояния плазмы зондом-2. У меня возникло предложение – определить их по отклонениям измеренных ФРЭЭ от функций Максвелла, сравнивая измеренные величины плотности электронного тока насыщения на зонд  $j_{es}$  с аналогичными расчётными плотностями тока  $j_{esM}$ , вычисленными по классической максвелловской формуле с использованием измеренных

параметров  $T_e$  и  $n_e$ . Такое сравнение в виде отношений  $j_{es}/j_{esM}$  было обозначено символом  $R_M$  (по имени Максвелла).

Отметим, что описанное в данном разделе сопоставление измеренных величин  $j_{es}$  с расчётными максвелловскими параметрами  $j_{esM}$ , определяемыми по классической формуле Максвелла, является предложенным мною методом оценки физического состояния плазмы, окружавшей неизолированные защитные экраны зондов, в виде отношений  $R_M = j_{es}/j_{esM}$  этих параметров.

Определение таких отношений для зонда-1 показало, что при максимальной длине экрана1 они выдали максимальные отклонения измеренных ФРЭЭ от максвелловских функций, которые линейно уменьшались в зависимости от длины экрана1 вплоть до нулевой его длины в специальной пристеночной позиции А (см. рис. 6), где отклонения ФРЭЭ от максвелловских функций дошли до 13% - это их минимальный уровень, не зависевший от падающей мощности ВЧГ. Стало видно, что при увеличении мощности ВЧГ эти отклонения становились меньше:

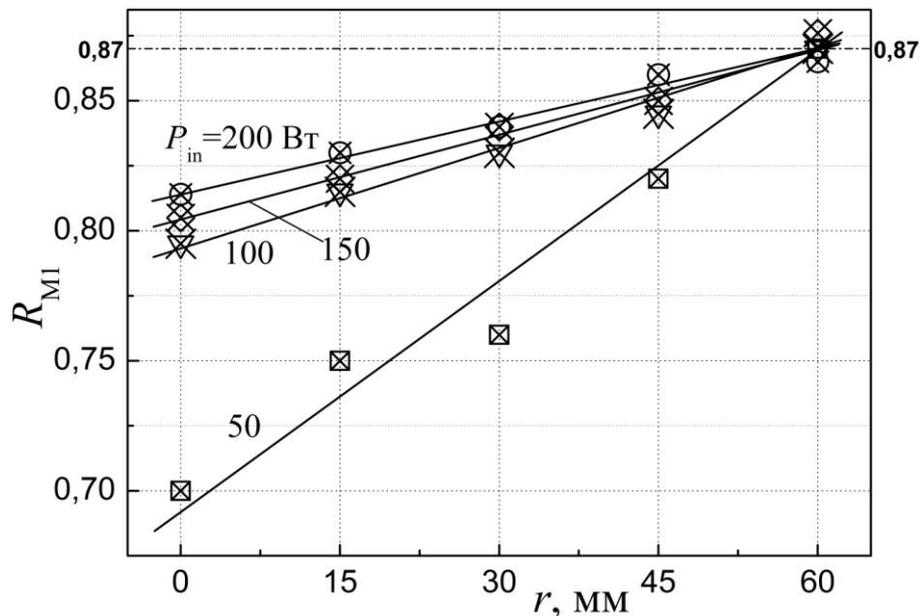


Рис. 9. Радиальные распределения  $R_{M1}$  при разных мощностях ВЧ генератора

Ниже будет показана физическая природа взаимодействий неизолированных экранов зондов с плазмой в виде возникающего в них явления несимметричного, короткозамкнутого двойного макро-зонда,

создающего в экране токи, прямо пропорциональные длине экрана. Так что линейная зависимость символа  $R_M$  от радиальной позиции зонда является следствием линейной зависимости тока КЗ в этих экранах от их длины.

В данной специальной позиции А ( $r=60$  мм)  $R_{M1} \approx 0,87 = \text{Const}$ . Это минимальное отклонение ФРЭЭ от максвелловских функций было вызвано влиянием находящегося здесь небольшого отрезка опорного зонда-1 (см. рис. б). Сравнение измерений обоими зондами в позиции А показало, что здесь из-за влияния экрана2 все параметры плазмы оказались занижены, т.е. экран2 внёс ошибки в результаты измерений зондом-2 и продемонстрировал возможные ошибки измерений зондом-1 в радиальных позициях, где присутствовал его защитный экран. Эти ошибки можно было увидеть в зависимостях от  $R_{M2}$  отношений  $x_2/x_1$ , где параметры  $x$  соответствовали  $T_e$ ,  $n_e$ ,  $V_s$  и  $j_{es}$ , измеренным зондами 2 и 1. Эти зависимости были объединены с особой точкой А зонда-1, для которого  $x_2/x_1 = 1$  при  $R_{M1} \approx 0,87$ . Такая ситуация справедлива при этом для обоих зондов без защитных экранов с их одинаковыми измерительными размерностями. В итоге были получены физические зависимости таких ошибок измерений от параметра  $R_M$ , которые представлены на рис. 10.

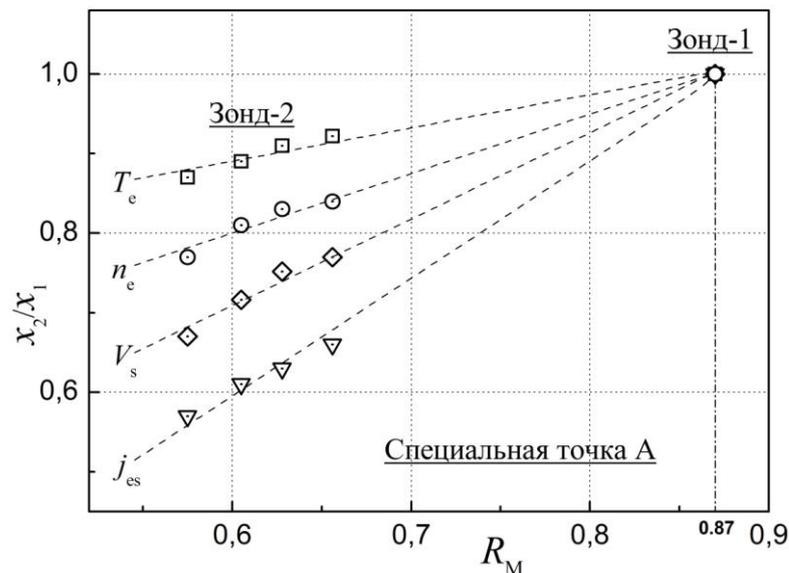


Рис. 10. Зависимости влияния неизолированных экранов на ошибки зондовых измерений от искажений ФРЭЭ

Объединение физических данных рис. 10 с радиальными функциями  $R_{M1}(r)$  для зонда-1 на рис. 9 при исключении символа  $R_M$  позволило получить радиальные зависимости ошибок измерений зондом-1 для всех четырёх зондовых параметров. Если результаты исходных измерений параметров плазмы поделить на радиальные зависимости их ошибок, то в итоге мы получаем поправленные данные этих измерений. В качестве примера на рис. 11 представлены радиальные распределения  $T_{e1}$  в начальном виде (пунктирные линии) и в исправленной форме (сплошные линии).

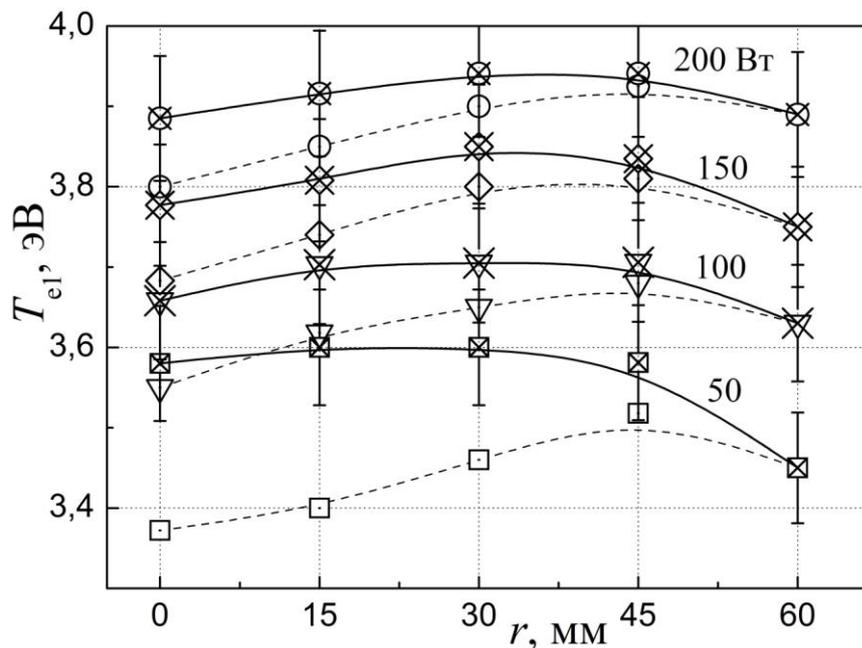


Рис. 11. Радиальные распределения  $T_{e1}(r)$ : начальные, показанные пунктиром, и скорректированные, представленные сплошными линиями

Отмечу, что среди положений, выносимых к моей защите, нужно отметить количественное физическое явление короткозамкнутого двойного макро-зонда в неизолированных защитных его экранах, определённое зондовой диагностикой плазмы по новому методу повышения точности данных измерений [А7, А8, И2]. Физическая идея об этом явлении в 1986 г. [И3] помогла мне улучшить плазмохимические процессы удаления фоторезиста с кремниевых пластин, а качественный характер этого явления

был определён мною в 2006 г. [51] в плазме электродугового разряда постоянного тока.

Результаты скорректированных пространственных распределений плазмы в ВЧИ газоразрядном узле теперь можно сравнить с аналогичными данными ионного двигателя ВЧИД-10 (цифра 10 означает начальный диаметр ионного пучка 10 см), использовавшего цилиндрический индуктор (данные профессора Лёба [48]). Такое сравнение для падающей мощности ВЧ генератора ~50 Вт представлено на рис. 12.

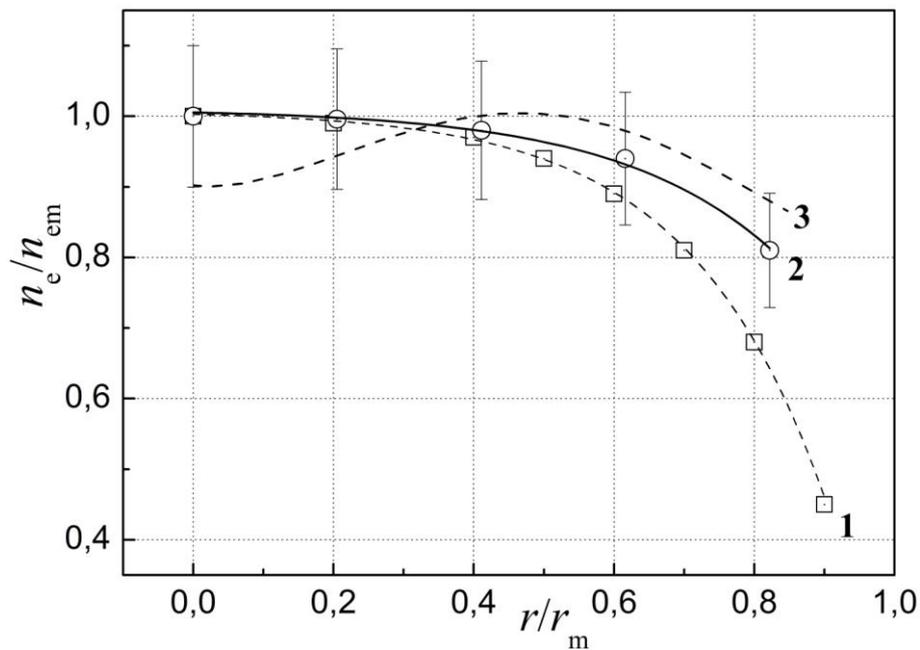


Рис. 12. Радиальные распределения  $n_e(r)$  в виде нормированных зависимостей для ионного двигателя ВЧИД-10 с цилиндрическим индуктором и для ВЧИ приборов с плоскими индукторами  
 1- ВЧИД-10 с цилиндрическим индуктором, 2- ВЧИ прибор с плоским индуктором в настоящем эксперименте, 3- качественное распределение  $n_e(r)$  с увеличенным внутренним диаметром индуктора в прототипе ВЧИ прибора, описанном в изобретении Годяка В.А. [5]

Видно, что плоский индуктор изучаемого ВЧИ прибора генерировал несколько более однородную плазму, что показывает сравнение кривых 2 и 1, а кривая 3 показала, что увеличение внутреннего диаметра плоского индуктора по сравнению с изучаемым ВЧИ прибором способно обеспечить

несколько большую общую однородность плазмы в ГРК перед зоной расположения ИОС.

Для оценки степени равномерности изучавшейся плазмы данный ВЧИ прибор был использован в качестве ВЧИ газоразрядного узла модели ВЧИИ-10, в которой щелевая ИОС формировала клиновидный ионный пучок. Оказалось, что полуугол раскрытия этого пучка поперёк щелей ИОС составил примерно  $3^\circ$ , что увеличило его дальнобойность (вдоль этих щелей раскрытие ионного пучка вообще отсутствовало). Этот результат представляется вполне позитивным. А если внутреннее отверстие плоского индуктора увеличить, следуя Годяку В.А. [5], то, по всей вероятности, угол раскрытия клиновидного ионного пучка станет ещё меньше, повышая дальнобойность данного пучка ионов.

**3.3г** Физический анализ влияния неизолированного зондового экрана на параметры изучаемой плазмы показал, что его влияние обусловлено эффектом несимметричного, короткозамкнутого двойного макро-зонда в крупных проводящих телах, контактирующих с плазмой, который был качественно исследован диссертантом во многих ранее выполненных работах. Оказалось, что сущность этого эффекта была качественно подтверждена плазмохимическими процессами обработки проводящих кремниевых пластин, три варианта которых были защищены ранее выданными изобретениями.

**3.3д** В этом разделе изложена запатентованная методика повышения точности диагностики плазмы одиночными цилиндрическими зондами с неизолированными защитными экранами.

**3.4** Уникальная диагностика изучавшейся ксеноновой плазмы стимулировала поиски расширения возможностей зондовой диагностики.

**3.4а** Скорректированные параметры зонда-1 были использованы для определения уточнённых параметров плазмы, согласно которым при отсутствии в изучаемой плазме неизолированных зондовых экранов она соответствовала  $R_M \sim 0,9 \pm 20\%$  (при падающей ВЧ мощности генератора не ниже 100 Вт). Поскольку измеренные параметры этой плазмы показали, что она была бесстолкновительной и практически изотропной при  $R_M \sim 0,9$ , в этом

случае её вполне можно было считать относительно близкой к максвелловской среде. В таких условиях справедливы «закон 3/2» и закон Бома (система из двух уравнений), где помимо обычно измеренных зондовых данных плазмы имеются три дополнительных параметра: коэффициент Бома  $C_B$ , толщины зондовых слоёв  $x$  для зондов и средняя масса ионов  $M_i$  для плазмы. Для получения этих параметров было предложено решение данной системы уравнений путём организации двух стадий экспериментов: 1) специальный эксперимент, который проводится с известной массой ионов  $M_i$  в опытах с особо чистым ксеноном и в чистом безмасляном вакууме; в результате через указанную систему 2-х уравнений были определены коэффициенты Бома  $C_B$  для двух моделей зондового слоя: Чайлда-Ленгмюра-Богуславского (ЧЛБ), согласно которой электроны формальным образом туда не могли проникать, и ступенчато-фронтальной (СФ) модели без такого ограничения (в случае СФ модели решаем указанную систему уравнений для ЧЛБ модели, определяя формальные коэффициент Бома  $C_{BЧЛБ}$  и величины  $x_{ЧЛБ}$ , а затем по данным Годяка В.А. [55], содержащим зависимости  $x_{СФ}=f(x_{ЧЛБ})$ , полученные для цилиндрического зонда Ленгмюра (это определило вид заявленной «методики диагностики максвелловской плазмы с использованием цилиндрических зондов Ленгмюра»), величины  $x_{ЧЛБ}$  переводятся в реальные  $x_{СФ}$  с последующим определением реального коэффициента Бома  $C_{BСФ}$  для этой модели); 2) эксперимент общего характера позволяет через предварительно найденные формальный и реальный коэффициенты Бома для двух моделей зондового слоя при пониженном его напряжении определять искомые параметры  $x$  и  $M_i$  решением указанной системы из 2-х уравнений [16].

Специальный эксперимент в изучаемой ксеноновой плазме, близкой к максвелловской среде, позволил определить для неё два коэффициента Бома: формальный  $C_{BЧЛБ} \approx 0,62$  для ЧЛБ модели и реальный  $C_{BСФ} \approx 0,745$  для СФ модели. В дальнейшем эти коэффициенты Бома могут использоваться в общих экспериментах с ксеноновой плазмой для получения двух пар дополнительных параметров: 1) определения реальных толщин зондовых слоёв  $x_{СФ}$  и средней массы ионов  $M_i$  для плазмы, если изучаемая плазма

окажется близка к СФ модели зондового слоя в максвелловской среде с реальным  $C_{БСФ} \approx 0,745$ ; 2) оценки формальных толщин зондовых слоёв  $x_{ЧЛБ}$  и средней массы ионов  $M_i$ , если изучаемая максвелловская плазма окажется близка к ЧЛБ модели зондового слоя с формальным коэффициентом Бома  $C_{БЧЛБ} \approx 0,62$ .

**3.46** Другое расширение возможностей зондовых измерений включило способ и устройство для ускоренной и эффективной оценки плотности ионного тока на эмиссионный электрод ИОС с помощью имитатора плоского пристеночного зонда, размещённого в торце радиально подвижного керамического стержня [А12], как показано на рис. 13.

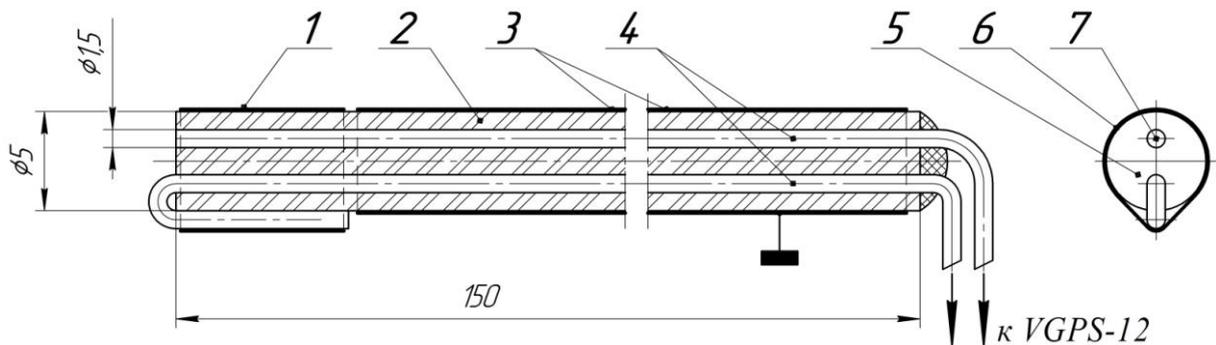


Рис. 13. Имитатор плоского пристеночного зонда  
(плоский зонд 7 – это торец проволоки 4)

Измерения этим плоским зондом показали, что параметры окружающей его пристеночной плазмы, включая её ФРЭЭ, были примерно в 2 раза ниже аналогичных данных, полученных цилиндрическими зондами в невозмущённой плазме ГРК. Следовательно, эта пристеночная плазма сильно отличалась от максвелловской среды, где формула Бома неприменима для вычислений плотности тока ионов на стенку под плавающим потенциалом. В этой связи оценка данного искомого параметра могла быть проведена только экстраполяцией ионных ветвей ВАХ плоского зонда к плавающему потенциалу. Эти линейные экстраполяция ионных ветвей полулогарифмических и двойных логарифмических ВАХ данного зонда выдали одинаковые результаты, которые создали оценку радиальных распределений плотностей ионных токов на эмиссионный электрод ИОС. В

итоге они обеспечили эффективное проектирование и изготовление модели ВЧИИ-10 для создания клиновидных ионных пучков. Измеренные в этой модели величины плотностей тока ионов на эмиссионный электрод ИОС показали, что оценки этих параметров в нашем имитаторе плоского пристеночного зонда не достигли реальных параметров ВЧИИ-10 примерно на 30%. Вероятной причиной этой неточности инженерного характера оказался ограниченный размер торца керамического стержня диаметра 5 мм при несимметричном окружении керамикой плоского зонда диаметра 1,5 мм.

### **В Заключении приводятся основные результаты работы:**

В данной диссертации разработаны и в проведённых экспериментах реализованы 9 новых методов диагностики: 2 метода интегральной диагностики двух запатентованных высокоресурсных электродуговых приборов постоянного тока, 1 запатентованный метод интегральной диагностики высокоресурсного А-плазматрона, 1 запатентованный метод интегральной диагностики ВЧИ газоразрядного узла ионного источника и 5 методов локальной диагностики данного ВЧИ прибора цилиндрическим зондом с неизолированным защитным экраном, из которых 3 метода запатентованы. Повышение точности измерений этим зондом определило количественное физическое явление короткозамкнутого двойного макрозонда в его защитном экране.

### **Получены следующие основные результаты:**

1. В части интегральной диагностики:

а) для двух запатентованных электродуговых приборов постоянного тока, высокоресурсных Т- и А-плазматронов с пониженной удельной эрозией их анодов до  $10^{-10}$  г/Кл, обеспечившей спектральную чистоту плазмы и их технические ресурсы порядка 1 года, разработаны и апробированы 2 метода интегральной диагностики, определявшей среднюю проводимость плазмы в положительных столбах их дуговых разрядов:

- измерение такого параметра модифицированным методом ВАХ в их анодных каналах при использовании дуговых разрядов двух видов: разряда с

распределённой анодной привязкой и с положительным столбом в анодном канале, а также свободно горящего во внутреннем межэлектродном пространстве дугового разряда с контрагированной анодной привязкой;

- при использовании в данных приборах стабилизирующих дуговых каналов данный параметр измеряется ВЧ контурным методом и стандартным методом ВАХ, определяя толщины непроводящих пограничных слоёв в этих каналах и уточняя среднюю проводимость их плазмы;

б) для высокоресурсного А-плазматрона разработана запатентованная интегральная диагностика измерением срока хранения сельхозпродуктов, обдуваемых его биомедицинской воздушной плазмой атмосферного давления, поддерживающей товарный вид и пищевую ценность этих продуктов.

в) для ВЧИ прибора разработан и апробирован запатентованный интегральный метод измерения детального распределения потерь ВЧ мощности в линии электропитания его разряда, включающий возможности определения паразитных утечек ВЧ мощности при их наличии, а в части его газового питания усовершенствована запатентованная газоэлектрическая развязка газоразрядного узла.

2. В части локальной диагностики ВЧИ газоразрядного узла ионного источника зондами Ленгмюра созданы 5 методов:

а) метод определения измерительных размеров одиночных цилиндрических зондов (диаметра и длины измерительной нити и диаметра ближайшего зондодержателя) для устранения занижений измеряемых параметров плазмы ближайшим зондодержателем;

б) метод оценки физического состояния плазмы, окружавшей неизолированные защитные экраны зондов, путём определения отношений измеренных плотностей электронного тока насыщения на зонд к таким же расчётным параметрам по классической формуле Максвелла при их обозначении символом  $R_M$ ;

в) запатентованные метод и устройство повышения точности диагностики плазмы основным одиночным цилиндрическим зондом-1 Ленгмюра с неизолированным защитным экраном<sup>1</sup> его выводов, используя дополнительный одиночный зонд-2 с экраном<sup>1</sup> таких же размеров в общей позиции с зондом-1, в которой экран<sup>1</sup> отсутствует, а экран<sup>2</sup> имеется; далее определяются зависимости ошибок измерений от параметра  $R_{M2}$ , рассчитываются радиальные распределения параметра  $R_{M1}$  и последующее объединение этих зависимостей с исключением параметра  $R_M$  уточняет результаты измерений зондом-1;

реализация данного метода диагностики определила количественное физическое явление короткозамкнутого двойного макро-зонда в его неизолированном защитном экране (физическая идея об этом явлении в 1986 г. помогла мне улучшить плазмохимические процессы удаления фоторезиста с кремниевых пластин, а в 2006 г. это качественное физическое явление было выявлено мною в металлическом теле под плавающим потенциалом в плазме электродугового разряда постоянного тока);

г) запатентованный метод определения трёх дополнительных параметров плазмы, близкой к максвелловской среде: коэффициента Бома, толщин зондовых слоёв и средней массы ионов для двух моделей зондового слоя (при отсутствии в нём электронов и при их наличии); проводится решение системы уравнений Бома и «закона 3/2» с использованием двух стадий экспериментов – специального эксперимента с особо чистой плазмой, где известна масса ионов, и общего эксперимента с предварительно найденными коэффициентами Бома для двух моделей зондового слоя; изучаемая плазма оказалась достаточно близка к максвелловской среде (отклонения  $\sim 10\%$ ), в которой при отсутствии электронов в зондовом слое коэффициент Бома оказался равен 0,62, а при их проникновении в этот слой коэффициент Бома достиг 0,745;

д) запатентованные метод и устройство измерения плотности ионного тока на эмиссионный электрод ИОС под плавающим потенциалом с

помощью имитатора плоского пристеночного зонда Ленгмюра в торце радиально подвижного керамического стержня; оценка данного параметра помогла проектированию ионно-ускорительных ячеек модели ВЧИИ-10, генерировавшей клинообразный ионный пучок с расчётным полууглом  $4,2^\circ$  раскрытия ионного пучка поперёк щелей ИОС; в экспериментах с этой моделью была подтверждена корректность такой диагностики при меньшем данном полуугле  $\sim 3^\circ$  и большей дальнобойности ионного пучка; измерения в этой модели выявили, что показания данного имитатора завысили её плотность ионного тока примерно на 30% в силу инженерной неточности его исполнения ( $\varnothing 5$  мм керамического стержня был несколько мал при несимметричном расположении в его торце плоского зонда  $\varnothing 1,5$  мм).

**Список работ по теме диссертации в физических журналах рейтингов Scopus, WoS и RSCI (РИНЦ)**

- A1. В.А. Рябый, В.А. Обухов, О достоверности зондовой диагностики ВЧ-плазмы // Прикладная физика 5, 46 (2012).  
V.A. Riaby, V.A. Obukhov, On the reliability of probe diagnostics in RF plasma // Plasma Physics Reports **39** (13), 1130 (2013).
- A2. А.Д. Портнов, В.А. Рябый, Е.А. Яковлев, Измерение средней электропроводности сильно ионизованной плазмы радиочастотным методом // Известия вузов. Авиационная Техника 4, 111 (1964).
- A3. В.А. Рябый, В.А. Обухов, А.П. Кирпичников, П.Е. Машеров, А.И. Могулкин, Методика интегральной диагностики высокочастотного индукционного газоразрядного блока ионного двигателя // Известия вузов. Авиационная техника 4, 82 (2015).  
V.A. Riaby, V.A. Obukhov, A.P. Kirpichnikov, P.E. Masherov, A.I. Mogulkin, Integral diagnostics method for a radio-frequency inductively coupled plasma discharge unit of an RF ion thruster // Russian Aeronautics 4, 448 (2015).
- A4. В.А. Рябый, П.Е. Машеров, В.А. Обухов, А.И. Могулкин, Контрольные индикаторы энергоэффективности ВЧ индукционного газоразрядного узла // Известия академии наук. Энергетика 3, 70 (2016).

- A5. P.E. Masherov, V.A. Riaby, V.A. Godyak, Integral electrical characteristics and local plasma parameters of RF ion thruster // *Review of Scientific Instruments* **87**, Paper 02B926 (3 pp.) (2016).
- A6. В.А. Рябый, П.Е. Машеров, Интегральная и локальная диагностики модели энергоэффективного ВЧ источника ионного пучка // *Известия академии наук. Энергетика* 2, 46 (2016).
- A7. V.A. Riaby, P.E. Masherov, V.P. Savinov, V.G. Yakunin, RF plasma probe diagnostics: a method of eliminating measurement errors for Langmuir probes with bare protective shields // *Journal of Physics: Conference Series* **958**, Paper 012006 (14 pp.) (2018).
- A8. V. Riaby, P. Masherov, V. Savinov, V. Yakunin, Method for reducing measurement errors of a Langmuir probe with a protective RF shield // *Journal of Applied Physics* **123**, Paper 163301 (6 pp.) (2018).
- A9. В.А. Рябый, В.П. Савинов, А.А. Спорыхин, В.Г. Якунин, Об экспериментальной оценке электростатического напряжения, возникающего на МОП-структурах при плазменной обработке // *Труды физико-технического института АН* 10, 150 (1995).
- A10. В.А. Рябый, В.П. Савинов, А.А. Спорыхин, В.Г. Якунин, Электрические пробой МОП структур – важнейший фактор плазменной деградации микроселектронных чипов // *Микроселектроника* **25** (2), 127 (1996).
- V.A. Riaby, V.P. Savinov, A.A. Sporykhin, V.G. Yakunin, MOS-structure electrical damage is the most important factor of microelectronic chips' plasma degradation // *Russian Microelectronics* **25** (2), 45 (1996).
- A11. А.Ф. Александров, В.А. Рябый, В.П. Савинов, В.Г. Якунин, Проводящая пластина в плазме – аналог короткозамкнутого двойного зонда Ленгмюра // *Микроселектроника* **34** (1), 21 (2005).
- A.F. Aleksandrov, V.A. Riaby, V.P. Savinov, V.G. Yakunin, Short-circuited double Langmuir probe as a model of a conducting wafer under plasma processing // *Russian Microelectronics* **34** (1) 18 (2005).
- A12. P. Masherov, V. Riaby, V. Abgaryan, Evaluation of ion current density distribution on an extraction electrode of a radio frequency ion thruster // *Plasma Sources Science and Technology* **26**, Paper 015004 (7 pp.) (2017).

A13. P.E. Masherov, V.A. Riaby, V.K. Abgaryan, Note: The Expansion of Possibilities for Plasma Probe Diagnostics // Review of Scientific Instruments **87**, Paper 056104 (3 pp.) (2016).

A14. P.E. Masherov, V.A. Riaby, V.K. Abgaryan, Note: Refined Possibilities for Plasma Probe Diagnostics // Review of Scientific Instruments **87**, Paper 086106 (3 pp) (2016).

A15. П.Е. Машеров, А.Ф. Пискунков, В.А. Рябый, В.П. Савинов, В.Г. Якунин, Новые применения зондов Ленгмюра // Ядерная физика и инжиниринг **7** (5), 453 (2016).

P.E. Masherov, A.F. Piskunkov, V.A. Riaby, V.P. Savinov, V.G. Yakunin, New applications of Langmuir probes // Physics of Atomic Nuclei **80** (11), 1697 (2017).

A16. П.Е. Машеров, В.А. Рябый, Зондовый метод измерения коэффициента Бома, толщин зондового слоя объёмного заряда и массы ионов // Журнал Технической Физики **88** (12), 1801 (2018).

P.E. Masherov, V.A. Riaby, Probe method for measuring the Bohm coefficient, space charge probe layer thickness, and ion mass // Technical Physics **63**(12), 1743 (2018).

A17. V.A. Riaby, V.P. Savinov, P.E. Masherov, V.G. Yakunin, Note: Additionally refined new possibilities of plasma probe diagnostics // Review of Scientific Instruments **89**, Paper 036102 (3 pp.) (2018).

A18. V.V. Balashov, M.V. Cherkasova, K.I. Kruglov, A.V. Kudriavtsev, P.E. Masherov, A.I. Mogulkin, V.A. Obukhov, V.A. Riaby, V.V. Svitina, Radio frequency source of a weakly expanding wedge-shaped xenon ion beam for contactless removal of large-sized space debris objects // Review of Scientific Instruments **88**, Paper 083304 (5 pp.) (2017).

A19. H.-J. Lee, V.Yu. Plaksin, V.A. Riaby, The Volt-Ampere characteristics of a DC arc plasmatron with a distributed anode spot // Thin Solid Films **515** (12), 5197 (2007).

A20. V.A. Riaby, V.Yu. Plaksin, J.H. Kim, Y.S. Mok, H.-J. Lee, C.K. Choi, Application of a high durability DC arc plasmatron to plasma processing of silicon substrates // Journal of Korean Physical Society **48** (6), 1696 (2006).

- A21. А.Ф. Пискунков, В.А. Рябый, В.В. Свотина, Х.-Дж. Ли, В.Ю. Плаксин, Высокоресурсный электродуговой плазматрон постоянного тока // Прикладная физика 6, 98 (2009).
- A22. V.A. Riaby, V.P. Savinov, A.V. Patziora, D.P. Tkachenko, Evaluation of the mean argon plasma conductivity and temperature at the exit of an atmospheric DC arc plasma torch // Journal of Physics: Conference Series **223**, Paper 012007 (5 pp.) (2010).
- A23. V.Yu. Plaksin, H.-J. Lee, V. A. Riaby, The effect of component gas on Diesel reformation by a plasmatron // IEEE Transactions on Plasma Science **35** (6), 1617 (2007).
- A24. В.А. Рябый, В.П. Савинов, В.Г. Якунин, Ю.А. Пирогов, И.А. Родин, Высокоресурсный плазматрон для применения в медицине // Медицинская техника **51** (3), 31 (2017).
- V.A. Riaby, V.P. Savinov, V.G. Yakunin, Yu.A. Pirogov, I.A. Rodin, A long-time plasmatron for use in medicine // Biomedical Engineering **51** (3), 195 (2017).
- A25. V.A. Riaby, V.P. Savinov, P.E. Masherov, V.G. Yakunin, Full diagnostics of an inductive plasma section of an ion thruster model // Eastern European Scientific Journal **32** (4), 59 (2018).

**в журналах, включённых в списки ВАК**

- Б1. В.А. Рябый, В.А. Обухов, О достоверности зондовой диагностики ВЧ-плазмы // Прикладная физика 5, 46 (2012).
- V.A. Riaby, V.A. Obukhov, On the reliability of probe diagnostics in RF plasma // Plasma Physics Reports **39** (13), 1130 (2013).
- Б2. А.Д. Портнов, В.А. Рябый, Е.А. Яковлев, Измерение средней электропроводности сильно ионизованной плазмы радиочастотным методом // Известия вузов. Авиационная Техника 4, 111 (1964).
- Б3. В.А. Рябый, В.А. Обухов, А.П. Кирпичников, П.Е. Машеров, А.И. Могулкин, Методика интегральной диагностики высокочастотного индукционного газоразрядного блока ионного двигателя // Известия вузов. Авиационная техника 4, 82 (2015).

V.A. Riaby, V.A. Obukhov, A.P. Kirpichnikov, P.E. Masherov, A.I. Mogulkin, Integral diagnostics method for a radio-frequency inductively coupled plasma discharge unit of an RF ion thruster // *Russian Aeronautics* 4, 448 (2015).

Б4. В.А. Рябый, П.Е. Машеров, В.А. Обухов, А.И. Могулкин, Контрольные индикаторы энергоэффективности ВЧ индукционного газоразрядного узла // *Известия академии наук. Энергетика* 3, 70 (2016).

Б5. В.А. Рябый, П.Е. Машеров, Интегральная и локальная диагностики модели энергоэффективного ВЧ источника ионного пучка // *Известия академии наук. Энергетика* 2, 46 (2016).

Б6. В.А. Рябый, В.П. Савинов, А.А. Спорыхин, В.Г. Якунин, Электрические пробой МОП структур – важнейший фактор плазменной деградации микроселектронных чипов // *Микроселектроника* **25** (2), 127 (1996).

V.A. Riaby, V.P. Savinov, A.A. Sporykhin, V.G. Yakunin, MOS-structure electrical damage is the most important factor of microelectronic chips' plasma degradation // *Russian Microelectronics* **25** (2), 45 (1996).

Б7. А.Ф. Александров, В.А. Рябый, В.П. Савинов, В.Г. Якунин, Проводящая пластина в плазме – аналог короткозамкнутого двойного зонда Ленгмюра // *Микроселектроника* **34** (1), 21 (2005).

A.F. Aleksandrov, V.A. Riaby, V.P. Savinov, V.G. Yakunin, Short-circuited double Langmuir probe as a model of a conducting wafer under plasma processing // *Russian Microelectronics* **34** (1) 18 (2005).

Б8. М.Н. Булаева, А.П. Кирпичников, И.В. Кравченко, Х.В. Лёб, П.Е. Машеров, В.А. Рябый, Д.П. Ткаченко, Повышение точности зондовой диагностики плазмы // *Вестник Казанского технологического университета* **15** (18), 69 (2012).

Б9. П.Е. Машеров, А.Ф. Пискунков, В.А. Рябый, В.П. Савинов, В.Г. Якунин, Новые применения зондов Ленгмюра // *Ядерная физика и инжиниринг* **7** (5), 453 (2016).

P.E. Masherov, A.F. Piskunkov, V.A. Riaby, V.P. Savinov, V.G. Yakunin, New applications of Langmuir probes // *Physics of Atomic Nuclei* **80** (11), 1697 (2017).

Б10. П.Е. Машеров, В.А. Рябый, Зондовый метод измерения коэффициента Бома, толщин зондового слоя объёмного заряда и массы ионов // Журнал Технической Физики **88** (12), 1801 (2018).

P.E. Masherov, V.A. Riaby, Probe method for measuring the Bohm coefficient, space charge probe layer thickness, and ion mass // Technical Physics **63**(12), 1743 (2018).

Б11. А.Ф. Пискунков, В.А. Рябый, В.В. Свотина, Х.-Дж. Ли, В.Ю. Плаксин, Высокоресурсный электродуговой плазматрон постоянного тока // Прикладная физика **6**, 98 (2009).

Б12. В.А. Рябый, В.П. Савинов, В.Г. Якунин, Ю.А. Пирогов, И.А. Родин, Высокоресурсный плазматрон для применения в медицине // Медицинская техника **51** (3), 31 (2017).

V.A. Riaby, V.P. Savinov, V.G. Yakunin, Yu.A. Pirogov, I.A. Rodin, A long-time plasmatron for use in medicine // Biomedical Engineering **51** (3), 195 (2017).

**изобретения и опубликованные международные заявки на изобретение**

И1. Рябый В.А., Годяк В.А., Обухов В.А., Машеров П.Е., Могулкин А.И.; Способ интегральной диагностики ВЧ индукционного газоразрядного устройства // Патент RU2601947, М. Кл. H05H 1/46 (26.03.2015).

И2. Рябый В.А., Машеров П.Е., Савинов В.П., Якунин В.Г.; Способ диагностики плазмы зондами Ленгмюра с выводами, защищёнными неизолированными снаружи экранами, и устройство для его осуществления // Патент RU2671948, М. Кл. H05H 1/00, H01J 27/00, патентообладатель МГУ им. М.В.Ломоносова (13.11.2017).

И3. Воробьёв В.В., Кондаков М.И., Маляров А.В., Мартынова Т.С., Рябый В.А., Савинов В.П., Спорыхин А.А., Якунин В.Г., Способ плазмохимического удаления органических соединений с поверхности полупроводниковых пластин // Авт. Свид. СССР № 1429842, М. Кл. H01L 21/306 (25.09.1986).

И4. Бояршинов Ю.А., Ермолова Н.А., Маляров А.В., Рябый В.А., Савинов В.П., Спорыхин А.А., Якунин В.Г., Плазмохимический реактор // Авт. Свид. СССР № 1609392, М. Кл. H01L 21/302 (17.06.1988).

- И5. Киреев В.Ю., Ковалевский В.Л., Рябый В.А., Савинов В.П., Спорыхин А.А., Якунин В.Г., Плазмохимический реактор баррельного типа // Патент RU2024990, М. кл. H01L 21/302 (23.03.1992).
- И6. Рябый В.А., Машеров П.Е., Способ локальной диагностики максвелловской плазмы с помощью одиночного зонда Ленгмюра // Патент RU2642493, М. кл. H05H 1/00 /; патентообладатель МАИ (03.11.2016).
- И7. Машеров П.Е., Пискунков А.Ф., Рябый В.А., Способ определения плотности ионного тока на контактирующую с плазмой стенку и устройство для его осуществления // Патент RU2660465, М. кл. H05H 1/00 (15.03.2016).
- И8. Riaby V.A., Savinov V.P., Kremen' A.I., Lee H.-J., Mok Y.S., DC arc plasmatron device // Korean Patent KR10-0721790, Int. Cl. H05H 1/00, H05B 7/00, H01J 37/00 (01.02.2005).
- И9. Lee H.-J., Mok Y.S., Riaby V.A., Plaksin V.Yu., DC arc plasmatron and method of using the same // American Patent US8129654, Int. Cl. B23K 10/00 (26.12.2006).
- И10. Иноземцев А.Н., Карпухина О.В., Рябый В.А., Савинов В.П., Якунин В.Г., Способ обработки овощей, плодовых, зерновых и зернобобовых культур и изготавливаемых из них продуктов // Патент RU2740372, М. кл. A01F 25/00 (18.11.2019).
- И11. Могулкин А.И., Балашов В.В., Нигматзянов В.В., Пейсахович О.Д., Рябый В.А., Свотина В.В., Ситников С.А., Газоэлектрическая развязка газоразрядного узла ионного источника и способ изготовления её основных деталей // Патент RU2752857, М. кл. H01J 27/00 (12.08.2020).
- И12. Lee H.-J., Mok Y.S., Riaby V.A., Plaksin V.Yu., DC arc plasmatron and method of using the same // International PCT Application WO2007/114556, Int. Cl. H05H 1/30 (04.04.2006).
- И13. Lee H.-J., Mok Y.S., Riaby V.A., Plaksin V.Yu., DC arc plasmatron and the method using the same // Korean PCT Application KR100807806, Int. Cl. H05H 1/48 (04.04.2006).
- И14. Lee H.-J., Mok Y.S., Riaby V.A., Plaksin V.Yu., DC arc plasmatron and the method of using the same // Japanese PCT Application JP2009532842, Int. Cl. H05H 1/48 (26.12.2006).

И15. Lee H.-J., Mok Y.S., Riaby V.A., Plaksin V.Yu., DC arc plasmatron and method of using the same // American PCT Application US2010/0201271, Int. Cl. H05H 1/24 (26.12.2006).

### Цитированная литература

1. Диагностика плазмы / под ред. Р. Хаддлстоуна, С. Леонарда. – М.: Изд. «Мир», 1967. – 515 с.
2. Методы исследования плазмы / под ред. В. Лохте-Хольтгревена. – М.: Изд. «Мир», 1971. – 552 с.
3. R.B. Piejak, V.A. Godyak, B.M. Alexandrovich, A simple analysis of an inductive RF discharge // *Plasma Sources Science and Technology* **1**, 179 (1992).
4. V.A. Godyak, R.B. Piejak, B.M. Alexandrovich, Electron energy distribution function measurements and plasma parameters in inductively coupled argon plasma // *Plasma Sources Science and Technology* **11**, 525 (2002).
5. V.A. Godyak, Electrical and plasma parameters of ICP with high coupling efficiency // *Plasma Sources Science and Technology* **20**, Paper 025004 (7 pp.) (2011).
6. Е.А. Кралькина, Индуктивный высокочастотный разряд низкого давления и возможности оптимизации источников плазмы на его основе // *Успехи физических наук* **178** (5), 519 (2008).
7. А.С. Коротеев, В.М. Миронов, Ю.С. Свирчук, Плазмотроны: конструкции, характеристики, расчёт, М.: Машиностроение (1993).
8. Э.И. Асиновский, А.В. Кириллин, В.Л. Низовский, Стабилизированные электрические дуги и их применение в теплофизическом эксперименте, М.: Наука, 105 (1992).
9. Р.С. Тухватуллин, Излучения и температурные поля в газоразрядной плазме // Докторская диссертация, Казань (2007).
10. J.-M. Baronnet, E.A. Ershov-Pavlov, S. Meggy, Plasma parameters of an argon DC arc with graphite electrodes // *Journal of Physics, D: Applied Physics* **32**, 2552 (1999).

11. С.В. Горячев, Э.Х. Исакаев, М.И. Мясников, В.Ф. Чиннов, Спектральные измерения локальных параметров плазмы с использованием ПЗС-матриц // Оптика и Спектроскопия **105** (6), 918 (2008).
12. С.В. Горячев, Экспериментальное исследование прикатодной области сильноточных электрических дуг // Кандидатская диссертация, Москва (2010).
13. S. Fesenko, A. Veklich, V. Boretskij, A.Y. Cressault, A. Gleizes, Ph. Teulet, Properties of thermal air plasma with admixing of copper and carbon // Journal of Physics: Conference Series **550**, Paper 012008 (8 pp.) (2014).
14. A.S. Pashchina, A.V. Efimov, V.F. Chinnov, A.G. Ageev, Features of the radial distributions of plasma parameters in the initial segment of a supersonic jet generated by a pulsed capillary discharge // Plasma Physics Reports **43** (7), 796 (2017).
15. L. Placentino, E. Colombo, E. Emolumento, E. Paganini, V. Piemontese, G. Tondello, Spectroscopic measurements of radial distribution of electron density and temperature in a SF<sub>6</sub> plasma // Pure Applied Optics **5**, 471 (1996).
16. I. Langmuir, H.M. Mott-Smith, Studies of electric discharges in gases at low pressures // General Electric Review **27**, 449, 538, 616, 762, 810 (1924).
17. H.M. Mott-Smith, I. Langmuir, The theory of collectors in gaseous discharges // Physical Review **28**, 727 (1926).
18. В.Л. Грановский, Электрический ток в газе. Т. 1. Общие вопросы электродинамики газов, М.-Л.: ГИТТЛ, 253 (1952).
19. Б.В. Алексеев, В.А. Котельников, Зондовый метод диагностики плазмы, М.: Энергоатомиздат (1988).
20. V.A. Godyak, V.I. Demidov, Probe measurements of electron-energy distributions in plasmas: what can we measure and how can we achieve reliable results? // Journal of Physics D: Applied Physics **44**, Paper 233001 (30 pp.) (2011).
21. R.J. Walther, M. Schaefer, J. Freisibger, Plasma diagnostics of the RF-ion thruster "RIT-10" // AIAA 8th Electric Propulsion Conference, Bethesda MD, USA, Report 72-472 (1972).
22. R.S. Devoto, Transport coefficients of partially ionized krypton and xenon // AIAA Journal **7** (2), 199 (1969).

23. M.J. Druyvesteyn, Der Niedervoltbogen // Zeitschrift fur Physik **64**, 781 (1930).
24. Langmuir Probe System of the Michigan University, Plasmadynamics & Electric Propulsion Lab (PEPL) – URL: [0 http://pepl.engin.umich.edu/diagnostics](http://pepl.engin.umich.edu/diagnostics).
25. П. Чан, Л. Тэлбот, К. Турян, Электрические зонды в неподвижной и движущейся плазме (теория и применение), М.: МИП (1978).
26. SmartProbe Automated Langmuir Probe Plasma Diagnostic (Scientific Systems Co. of the Lam Research Ireland Ltd.) – URL: <http://www.scisys.com/langmuir.cfm>.
27. Hiden ESPION Advanced Langmuir Probe System (Hiden Analytical Ltd.) – URL: <http://www.hidenanalytical.com>.
28. PLASMART Probe System (Plasma Technology and Applications) – URL: <http://www.plasmart.com>.
29. VGPS Probe System (Plasma Sensors Co.) – URL: <http://www.plasmasensors.com>.
30. V.A. Godyak, R.B. Piejak, B.M. Alexandrovich, Measurements of electron energy distribution in low-pressure RF discharges // Plasma Sources Science and Technology **1**, 36 (1992).
31. V.A. Riaby, V.A. Obukhov and P.E. Masherov, On the objectivity of plasma diagnostics using Langmuir probes // High Voltage Engineering Suppl. **38**, 790 (2012).
32. П.Е. Машеров, Разработка космического источника ионов на основе высокочастотного ионного двигателя // Кандидатская диссертация, НИИ ПМЭ МАИ (Рябый В.А.–научн. руководитель), Москва (2016).
33. K. Takahashi, C. Charles, R. W. Boswell, T. Kaneko, R. Hatakeyama, Measurement of the energy distribution of trapped and free electrons in a current-free double layer // Physics of Plasmas **14**, Paper 114503 (4 pp.) (2007).
34. K. Takahashi, C. Charles, R. W. Boswell, T. Fujiwara, Electron energy distribution of a current-free double layer: Druyvesteyn theory and experiments // Physical Review Letters **107**, Paper 035002 (4 pp.) (2011).
35. X. M. Zhu, W. C. Chen, Y. K. Pu, Determination of the electron energy distribution functions in the low-pressure gas-mixture discharges by using an OES

- line-ratio method and a collisional-radiative model of argon and krypton // Proc. 30 International Conference on Phenomena in Ionized Gases, Belfast, Northern Ireland, UK, Report No. B6 (2011).
36. Y. Raitses, P. Baele, V.M. Donnelly, A parametric study of DC-RF Penning-type plasma discharge // Proc. 64 Gaseous Electronics Conference, Salt Lake City, UT, USA (2011).
37. V.A. Godyak, Y. Raitses, N.J. Fisch, RF Plasma Cathode-Neutralizer for Space Applications // Proc. 30 International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy (2007).
38. Н.М. Родигин, Индукционный нагрев стальных изделий токами нормальной частоты, М.: Металлургиздат (1950).
39. А.Л. Сурис, Плазмохимические процессы и аппараты, М.: Химия (1989).
40. Физика, техника и применение низкотемпературной плазмы // 4-я Всесоюзн. конф. по физике и генераторам низкотемпературной плазмы, Алма-Ата: Казахский политехнический институт (1970).
41. X. Zhou, J. Heberlein, An experimental investigation of factors affecting arc-cathode erosion // Journal of Physics D **31**, 2577 (1998).
42. Ю.П. Райзер, Физика газового разряда. Учебное руководство, М.: Наука (1987).
43. Godyak V.A., Crapuchettes C., Nagorny V., Inductive Plasma Source // PCT Patent Application WO 2011/022612 A2, Int. Cl. H05H 1/34, H05H 1/40, filed 21.08.2009.
44. R.S. Devoto, Transport coefficients of partially ionized krypton and xenon // AIAA Journal **7** (2), 199 (1969).
45. V.A. Godyak, B.M. Alexandrovich, V.I. Kolobov, Lorentz force effects on the electron energy distribution in inductively coupled plasmas // Physical Review E **64**, Paper 026406 (10 pp.) (2001).
46. A. Rousseau, E. Teboul, N. Lang, M. Hannemann, J. Ropcke, Langmuir probe diagnostic studies of pulsed hydrogen plasmas in planar microwave reactors // Journal of Applied Physics **92** (7), 3463 (2002).

47. V. Riaby, V. Savinov, P. Masherov, V. Yakunin, Elevating the precision of plasma probe diagnostics by elimination of bare probe protective shields' influence // *Journal of Chemistry: Education, Research and Practice* **1** (1), 1 (2017).
48. B. Lenz, R.J. Walther, H. Loeb, Plasma diagnostic contributions to advanced RIT-engines // *AIAA International Electric Propulsion Conference*, Key Biscayne, Florida, USA, Report No. 76-1012 (1976).
49. N. A. Iermolova, A. V. Maliarov, V. A. Riaby, V. P. Savinov, A. A. Sporykhin, L. N. Sheiko, V. G. Yakunin, Physical aspects of dry plasma-chemical etching of photoresist in barrel type reactors // *Contr. Papers of the 20th ICPIG (Il Ciocco, Italy)*, Pisa: Felici Editore, **1**, 325 (1991).
50. A.F. Alexandrov, V.A. Riaby, V.P. Savinov, V.G. Yakunin, Electrophysical interaction of silicon wafers with glow discharge plasmas // *Contr. Papers XI Int. Conf. on Gas Discharges and their Applications (Tokyo, Japan)*, Tokyo: Part I, 498 (1995).
51. H.-J. Lee, V.Yu. Plaksin, V.A. Riaby, Measurements of the floating electric potentials in a free plasma flow generated by a DC arc plasmatron // *Proc. Int. Conf. on Advanced Technologies (Cheju, Rep. of Korea)*, Cheju: Cheju Nat. Univ., 11 (2006).
52. P.E. Masherov, V.A. Obukhov, V.A. Riaby, V.P. Savinov, Decrease of plasma perturbations caused by Langmuir probes // *Proc. 21 Intern. Symp. on Plasma Chemistry (Cairns, Australia)*, Cairns: Austr. Nat. Univ., Rep. 410 (2013) – URL: [www.ispc-conference.org/ispcproc/ispc21/ID410.pdf](http://www.ispc-conference.org/ispcproc/ispc21/ID410.pdf).
53. D. Bohm, *Characteristics of Electrical Discharges in Magnetic Fields*, ed. by A. Guthrie & R. K. Wakerling, N.-Y.-Toronto-London: McGraw-Hill Book Co., Inc., Ch. 1&2 (1949).
54. О.В. Козлов, *Электрический зонд в плазме*, М.: Атомиздат (1969).
55. R.B. Piejak, V.A. Godyak, R. Garner, B.M. Alexandrovich, The hairpin resonator: A plasma density measuring technique revisited // *Journal of Applied Physics* **95** (7), 3785 (2004).
56. R. Piejak, V. Godyak, B. Alexandrovich, N. Tishchenko, Surface temperature and thermal balance of probes immersed in high density plasma // *Plasma Sources Science and Technology* **7**, 590 (1998).

57. V.A. Riaby, V.P. Savinov, P.E. Masherov, V.G. Yakunin, Additionally refined new possibilities of plasma probe diagnostics // Proc. 22<sup>nd</sup> Int. Conf. on Gas Discharges and their Applications (Novi Sad, Serbia), Serbia: **2**, Rep. 2, 587 (2018).
58. B. Nuhn, G. Peter, Comparison of classical and numerical evaluation of Langmuir probe characteristics at low plasma densities // Proc. XIII Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Contributed Papers (Berlin, Germany), **2**, 97 (1977).
59. А.С. Аньшаков, Г.Г. Волокитин, О.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова, Электротехнологические установки для плазменно-термической обработки материалов, Томск: Изд. ТГАСУ (2014).
60. V.Yu. Plaksin, V.A. Riaby, J.H. Kim, C.K. Choi, H.-J. Lee, Plasma-chemical processing of silicon substrates using a novel arc plasmatron // IEEE Conference “International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum” (Matsue, Japan), **2**, 554 (2006).
61. V.Yu. Plaksin, J.H. Kim, Y.S. Mok, H.J. Lee, V.A. Riaby, Reduction of NO<sub>x</sub> content in Diesel engine emission using plasmatron fuel converter // Proc. VI Korea-China Workshop on Clean Energy Technol. (Busan, Rep. of Korea), Seoul: Korean Inst. Chem. Eng. 198 (2006).
62. J.H. Kim, Y.S. Mok, C.K. Choi, V.Yu. Plaksin, V.A. Riaby, H.-J. Lee, Development of a high durability atmospheric DC arc plasmatron // Proc. Dry Process Intern. Symposium (Cheju, Rep. Korea), Tokyo: Inst. Elctr. Eng. of Japan, Session 10, Rep. 10-60, 359 (2005).
63. В. Финкельбург, Г. Меккер, Электрические дуги и термическая плазма, ред. В.А. Фабрикант, М.: ИИЛ (1961).
64. В.А. Рябый, И.В. Никитиных, Уточнённая оценка средней температуры аргоновой плазмы на срезе сопла высокоресурсного плазматрона // Авиационно-космическая техника и технология, Харьков: Изд. ХАИ, 10 (77), 98 (2010).
65. S.-C. Lin, E. Resler, A. Kantrovitz, Electrical conductivity of highly ionized argon produced by shock waves // Journal of Applied Physics **26** (1), 95 (1955).
66. H.W. Emmons, Arc measurement of high temperature gas transport properties // The Physics of Fluids **10** (6), 1125 (1967).

67. J.C. Morris, R.P. Rudis, J.M. Yos, Measurements of electrical and thermal conductivity of hydrogen, nitrogen, and argon at high temperatures // *The Physics of Fluids* **13** (3), 608 (1967).
68. I. Bues, H.J. Patt, J. Richter, Uber die elektische Leitfahgkeit und die Warmeleitfahigkeit des Argons bei hohen Temperaturen // *Zeitschrift fur angewandte Physik* **22** (4), 345 (1967).
69. В.А. Батулин, Экспериментальное определение электропроводности плазмы аргона в стабилизированной дуге // *Журнал прикладной механики и технической физики* **11** (2), 153 (1970).
70. R.S. Devoto, Transport coefficients of partially ionized argon // *The Physics of Fluids* **10** (2), 354 (1967).
71. В.А. Рябый, В.П. Савинов, В.Г. Якунин, Практические применения высокоресурсного электродугового плазматрона постоянного тока // *Труды 10-й Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике»*, М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, Ч. II, 192 (2019).
72. О.В. Карпухина, В.Г. Якунин, В.П. Савинов, А.Н. Иноземцев, В.Ю. Тимошенко, В.А. Рябый, Эффект низкотемпературной плазмы атмосферного давления на жизнедеятельность простейшего организма *PARAMECIUM CAUDATUM* // *Труды 10-й Всеросс. Конф. «Необратимые процессы в природе и технике»*, М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, Ч. I, 254 (2019).
73. V.Riaby, V.Savinov, P.Masharov and V.Yakunin, Full diagnostics of an inductive plasma section of an ion thrusters // *Dusseldorf: Lambert Academic Publishing* (2018) – 102 pp.