

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
НАБЕРЕЖНОЧЕЛНИНСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ  
«КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

**Габдрахманов А.Т., Галиакбаров А.Т.**

**Измерение скорости движущейся дуги одиночным  
зондом**

**Учебно-методическое пособие к лабораторным работам и  
практическим занятиям по дисциплинам  
«Концентрированные потоки энергии и физические основы  
их генерации», «Электрические разряды в газах», «Основы  
физических процессов в плазме и плазменных установках»**

Набережные Челны

2018

УДК 533.9

*Рекомендовано учебно-методической комиссией кафедры высокоэнергетических процессов и агрегатов Набережночелнинского института КФУ.*

**Габдрахманов А.Т., Галиакбаров А.Т.**

**Измерение скорости движущейся дуги одиночным зондом:** учебно-методическое пособие / Габдрахманов А.Т., Галиакбаров А.Т. – Набережные Челны: НЧИ (ф) КФУ, 2018. – 24 с.

Учебно-методическое пособие предназначено для использования при проведении лабораторных работ и практических занятий по дисциплинам: «Концентрированные потоки энергии и физические основы их генерации», «Электрические разряды в газах», «Основы физических процессов в плазме и плазменных установках» для студентов направления 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Рецензент: к.т.н., доцент, доцент кафедры физики НЧИ КФУ Тазмеев Х.К.

@ НЧИ (ф) КФУ

2018 г.

## Содержание

Введение	4
Режимы работы зонда	5
Качественное рассмотрение работы зондов	10
Одиночный электрический зонд	10
Оценка температуры и концентрации заряженных частиц в методе одиночного зонда	13
Схема измерения одиночным зондом	16
Экспериментальное определение скорости движения дуги	18
Порядок выполнения работы.	21
Контрольные вопросы.	21
Список литературы	22

## Введение

Диагностика плазмы – одна из наиболее бурно развивающихся областей экспериментальной и технической физики. Предлагаемое вниманию студентов учебное пособие посвящено лишь одному из методов диагностики – использованию электрических зондов. Несмотря на ограничения в применении методики зондовых измерений и успешное развитие бесконтактных методов диагностики (оптических, в том числе лазерных, и высокочастотных), интерес к использованию электрических зондов в газовой электронике, в диагностике струй электрореактивных двигателей, а также для исследования ионосферной и космической плазмы не ослабевает.

Зондовый метод исследования плазмы был разработан *Ленгмюром* в 1924 году, и поэтому его часто называют методом ленгмюровских зондов.

*Электрический* (или *электростатический*) *зонд* представляет собой один или несколько небольших вспомогательных электродов, погружённых в плазму. Обычно используют зонды двух типов: одиночный и двойной зонд.

В «*одиночном зонде*» имеется один электрод, который вводится в плазму и соединяется с источником питания, так, что зонд может находиться под различным потенциалом (положительным или отрицательным) относительно плазмы. При этом измеряют зависимость тока на зонд от потенциала зонда.

Типичный «*двойной зонд*» состоит из двух электродов обычно равной площади, находящихся в контакте с плазмой. В этом случае измеряют ток, протекающий в плазме между электродами, в зависимости от приложенного между ними напряжения.

## Режимы работы зонда

Теория электрических зондов осложняется тем, что поверхности зондов являются граничными по отношению к плазме, и уравнения, описывающие поведения плазмы, вблизи границ изменяются. В этой области не выполняется условие нейтральности плазмы (концентрации ионов и электронов различны). В этом тонком слое, называемом *дебаевским слоем* объёмного разряда, могут возникнуть сильные электрические поля. В отсутствие магнитных полей вид зондовой характеристики при измерениях в движущейся плазме зависит от параметров, которые можно объединить в три группы.

### Группа параметров, определяющих вид зондовой характеристики

Группа	Параметры
1	$\lambda_D/L, \lambda/L, \lambda/\lambda_D$
2	$U_z, T_i/T_e, D$
3	В сплошной среде: $S_{Ci}, Re, M, T/T_w, \gamma, \beta$ ; В бесстолкновительной и переходной плазме $1/R, V/c$

Три параметра первой группы (где  $\lambda_D$  - дебаевская длина экранирования;  $L$  - характерная длина;  $\lambda$  - некоторая длина свободного пробега частиц) определяют различные области, в которых может находиться электрический зонд. Хорошо известные области работы зондов определяются различными интервалами значений параметров  $\lambda_D/R, \lambda/R$  и  $\lambda/\lambda_D$  (для иллюстрации основных свойств различных областей в качестве характерной длины оболочки зонда  $L$  выбран радиус зонда  $R$ ). Все указанные предельные случаи иллюстрируются на трёхмерной  $R$ - $\lambda_D$ - $\lambda$ -диаграмме (рисунок 1).

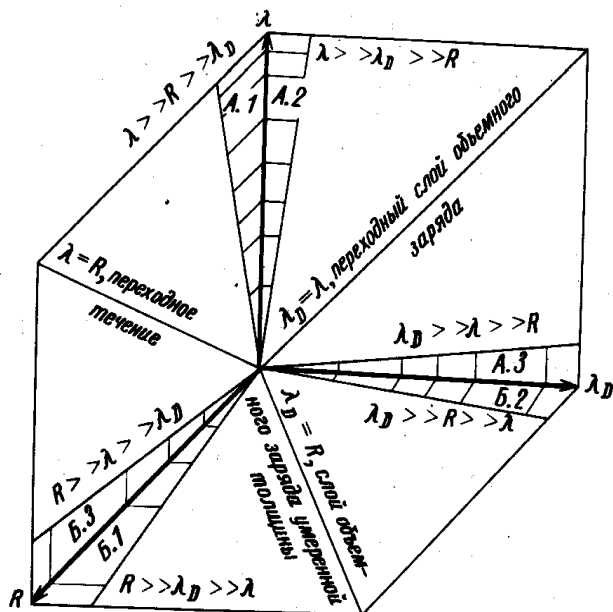


Рисунок 1. Трёхмерная диаграмма, иллюстрирующая различные режимы работы зонда

Согласно рисунку 1, для заданных значений параметров второй и третьей групп можно выделить на диаграмме шесть различных режимов работы зонда, которые делятся на две области в зависимости от величины числа Кнудсена  $K_n$  ( $K_n = \lambda / R$ ):

А.  $K_n \gg 1$ . Классический ленгмюровский зонд:

1.  $\lambda \gg R \gg \lambda_D$  - обычный тонкий слой объёмного заряда;
2.  $\lambda \gg \lambda_D \gg R$  - предельный случай орбитального движения - толстый слой объёмного заряда;
3.  $\lambda_D \gg \lambda \gg R$  - столкновительный толстый слой объёмного заряда (смешанный случай).

Б.  $K_n < 1$ . Электрический зонд в сплошной среде:

1.  $R \gg \lambda_D \gg \lambda$  - столкновительный тонкий слой объёмного заряда;
2.  $\lambda_D \gg R \gg \lambda$  - столкновительный толстый слой объёмного заряда;
3.  $R \gg \lambda \gg \lambda_D$  - бесстолкновительный тонкий слой объёмного заряда (случай плотной плазмы).

Большинство теорий зонда являются асимптотическими по одному из трёх параметров  $\lambda_D$ ,  $\lambda$  и  $R$ , а области применения этих теорий расположены внутри заштрихованных зон на рисунке 1. Например, область, соответствующая режиму А.1, лежит в плоскости  $\lambda_D \cong 0$  в зоне, где наибольшим из трёх параметров является  $\lambda$ . Аналогично область, соответствующая режиму Б.3, лежит в той же плоскости, но в зоне, где наибольшим параметром является  $R$ .

Условие  $K_n \gg 1$  не обязательно соответствует бесстолкновительному режиму. Слой объёмного заряда может быть как бесстолкновительным (режимы А.1, А.2), так и столкновительным (режим А.3) в зависимости от соотношения величин  $\lambda_D$  и  $\lambda$ . Условие  $K_n \ll 1$  соответствует такому случаю, когда в газе (течение сплошной среды) *всегда* реализуется столкновительный режим, в то время как в слое объёмного заряда режим может быть как столкновительным, так и бесстолкновительным в зависимости от соотношения величин  $\lambda_D$  и  $\lambda$ , что видно из сравнения режимов Б.1 и Б.2 с Б.3.

Кроме того, имеется несколько *переходных* областей, которые на рисунке 1 представлены диагоналями. Диагональ между зонами А.1 и Б.3 характеризует переходную область с  $K_n \cong 1$ , а диагональ между зонами А.2 и А.3 - переходный слой объёмного заряда с  $\lambda_D \cong \lambda$ . Переход от тонкого слоя объёмного заряда к толстому наблюдается как в области сплошной среды (между зонами Б.1 и Б.2), так и в области бесстолкновительного режима

(между зонами А.1 и А.2). Наконец условие  $R \cong \lambda$  соответствует случаю двойного переходного режима.

Другим способом представления рассмотренных выше областей является их изображение на двумерном графике (рисунок 2).

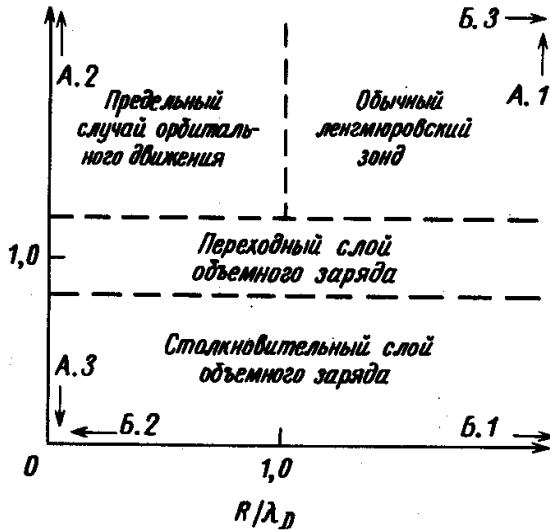


Рисунок 2. Двумерное представление различных режимов работы зонда

Наиболее важным параметром второй группы является потенциал зонда  $\psi$ , который определяет величину тока на зонд и может изменяться от большого отрицательного значения до умеренных положительных значений:

$$\Psi = \frac{e \cdot U_3}{k \cdot T_e},$$

где  $\psi$  - нормированный потенциал зонда;  $e$  - заряд электрона;  $U_3$  - электрический потенциал зонда;  $k$  - постоянная Больцмана;  $T_e$  - температура электронов.



Отношение температур ионов и электронов  $T_i/T_e$  для большинства плазменных образований заключено в пределах от нуля до единицы. Это отношение характеризует степень термодинамической неравновесности в плазме между электронами и тяжёлыми частицами. Условие  $T_i/T_e=1$  соответствует термодинамически равновесной плазме, а условие  $T_i/T_e \rightarrow 0$  соответствует наличию холодных ионов в замороженном потоке. Число Дамкёлера  $D$ , равное отношению скорости ионизации-рекомбинации к скорости диффузии ионов, характеризует степень химической неравновесности. Например, при  $D \rightarrow 0$  поток химически заморожен, а при  $D \rightarrow \infty$  находится в химическом равновесии.

В третьей группе объединены параметры, которые зависят от свойств плазмы и геометрической формы рассматриваемого зонда. Как правило, в сплошной среде используются зонды, заделанные заподлицо в стенку, затупленные зонды для измерений параметров торможения (например, цилиндры с полусферической головкой) или зонды в виде острых конусов. Зонды для измерений в бесстолкновительном и переходном режимах обычно представляют собой цилиндры или сферы, а иногда круглые диски. Для зондов в сплошной среде наиболее важными параметрами обычно являются:  $S_{ci}$  (число Шмидта для ионов),  $Re$  (число Рейнольдса),  $\beta$  (отношение коэффициентов диффузии ионов и электронов),  $M$  (число Маха),  $T/T_z$  (отношение температур плазмы и зонда) и отношение удельных теплоемкостей  $\gamma$ , однако они не обязательно составляют полную систему параметров.

Два дополнительных параметра,  $l/R$  и  $V/c$  в третьей группе введены специально для анализа цилиндрических зондов, оси которых расположены в направлении потока. В этом случае  $l/R$  - отношение длины цилиндра к его радиусу, а  $V/c$  - отношение скорости плазменного потока к характеристической скорости

$$c = \sqrt{\frac{k \cdot T_e}{m_i}},$$

где  $m_i$ - масса иона. С помощью этих параметров учитывают конечные размеры зонда при введении поправки на влияние конвекции в потоке плазмы.

Наконец, в отдельных случаях кроме указанных трёх групп параметров необходимо ввести ещё несколько дополнительных групп. Одна из этих групп связана с турбулентностью плазмы или явлениями перехода и включает такие параметры, как частота ионных плазменных колебаний, длина ионно-звуковой волны. Другая группа связана с условиями на поверхности зонда, например существованием или отсутствием термоэлектронной эмиссии, степенью загрязнения поверхности. Третья группа параметров связана с наличием магнитных полей в плазме. Вводимые в этом случае новые параметры включают гиромангнитные радиусы (или гиромангнитные частоты) электронов и ионов, которые в сочетании с другими параметрами образуют ряд новых дополнительных отношений.

## **Качественное рассмотрение работы зондов**

### **Одиночный электрический зонд**

На рисунке 3 показан обычный вид вольт-амперной (зондовой) характеристики (ВАХ) одиночного зонда, находящегося в типичной плазменной среде. В случае стационарной плазмы эту кривую можно получить путём постепенного изменения напряжения на зонде, а в случае нестационарной плазмы – путём использования источника с быстрой развёрткой напряжения. Поведение ВАХ качественно объясняется следующим образом. При больших отрицательных значениях потенциала

зонда (участок  $ab$ ) он отталкивает практически все находящиеся вблизи него электроны. Электронный ток на зонд пренебрежимо мал, и электрический ток на зонд определяется ионным током  $I_i$ , который по порядку величины равен диффузионному ионному току. Поэтому участок кривой  $ab$  называют областью «ионного тока насыщения»  $I_{is}$ . Физическая сущность такого «насыщения» зависит от рассмотренных выше основных параметров, в частности от того, является ли плазма столкновительной или бесстолкновительной по отношению к зонду. Если величина отношения  $T_e/T_i$  известна, то во многих случаях можно связать между собой  $I_{is}$  концентрацию электронов  $N_e$ .

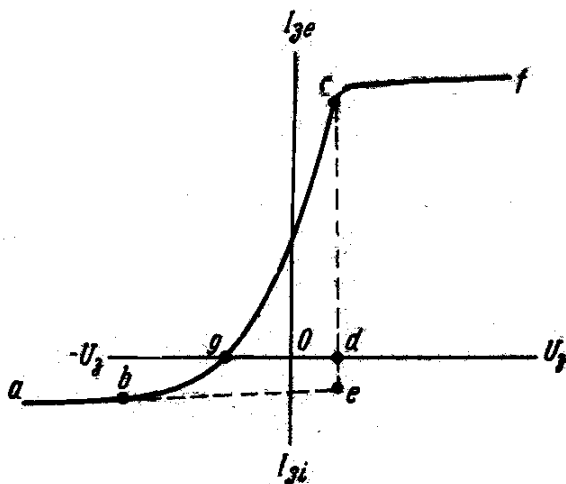


Рисунок 3. ВАХ одиночного зонда

Когда потенциал  $U_z$  становится менее отрицательным по отношению к плазме (участок  $bg$ ), наиболее высокоэнергетические электроны плазмы оказываются в состоянии преодолеть электрическое поле зонда, тормозящее их движение, и, следовательно, достичь его поверхности. При этом вклад

электронного тока в измеренный ток зонда увеличивается, что приводит к наблюдаемому уменьшению суммарного тока по абсолютной величине.

По мере того как потенциал зонда становится всё менее отрицательным, достигается точка  $g$  на кривой, в которой электронный ток на зонд становится равным ионному току  $I_e = I_i$ , и суммарный ток на зонд, суммарный ток на зонд, измеряемый прибором, равен нулю. Потенциал в этой точке называется плавающим потенциалом. При достижении плавающего потенциала зонд всё ещё имеет отрицательный потенциал относительно плазмы и по существу продолжает собирать как ионный ток насыщения, так и нейтрализующий его электронный ток.

Вблизи точки  $c$ , когда потенциал зонда близок к потенциалу плазмы, напряжённость электрического поля зонда стремится к нулю, и электронный ток увеличивается до значения, которое определяется естественной

диффузией электронов и приблизительно в  $\sqrt{\frac{m_i \cdot T_e}{m_e \cdot T_i}}$  раз превышает ионный ток насыщения.

На участке кривой  $gc$  потенциал зонда всё ещё отрицателен относительно потенциала плазмы, соответствующим потенциалу зонда в точке  $c$ , однако по мере увеличения  $U_3$  зонд притягивает всё больше электронов, и суммарный ток на зонд является электронным.

На участке  $cf$  потенциал зонда становится положительным относительно потенциала плазмы и полный ток определяется электронным током вследствие отталкивания зондом ионов и притягивания им электронов. Участок  $cf$  называется областью «электронного тока насыщения»  $I_{es}$ .

Таким образом, нахождение точки  $c$  зондовой характеристики позволяет определить:

1. потенциал плазмы в точке, где расположен зонд;

2. плотность беспорядочного ионного тока в плазме  $J_i = I_{zi}/S_3$ , где  $I_{zi}$  - значение ионного тока на зонд при потенциале зонда, равном потенциалу плазмы,  $S_3$  - площадь зонда. Величина  $I_{zi}$  на рисунке 3 определяется отрезком  $de$ .
3. плотность беспорядочного электронного тока в плазме  $J_e = I_{ze}/S_3$ , где  $I_{ze}$  - значение электронного тока на зонд при потенциале плазмы. Поскольку  $J_e \gg J_i$ ,  $J_e \approx J_3$ , в результате чего  $I_{ze}$  определяется отрезком  $ce$ .

### **Оценка температуры и концентрации заряженных частиц в методе одиноконного зонда**

Рассмотрим закон изменения электронного тока  $I_{ze}$  на восходящем участке ВАХ. Долететь до поверхности зонда могут только те электроны, у которых составляющая скорости  $V_x$  (в направлении оси  $x$ , перпендикулярной

поверхности зонда) удовлетворяет условию:  $\frac{m_e \cdot V_x^2}{2} \geq e \cdot U_3$ . Предположим,

что электроны в плазме имеют *максвелловское распределение по скоростям* с

температурой  $T_e$ , средней арифметической скоростью  $\bar{V}_e = \sqrt{\frac{8 \cdot k \cdot T_e}{\pi \cdot m_e}}$  и

наиболее вероятной скоростью  $V_0 = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \bar{V}_e$ . Число электронов со

скоростями в интервале от  $V_x$  до  $V_x + dV_x$ , попадающих в 1 с на 1 м<sup>2</sup> оболочки, окружающей зонд, равно:

$$dN_{V_x} = V_x \cdot \frac{n_e}{\sqrt{\pi} \cdot V_0} \cdot \exp\left(-\frac{V_x^2}{V_0^2}\right) dV_x,$$

где  $n_e$  – концентрация электронов.

Полное число электронов, попадающих на зонд получается интегрированием этого выражения в пределах от  $V_x = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U_3}{m_e}}$  до  $V_x = \infty$

$$v_e = \int_{\sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U_3}{m_e}}}^{\infty} dv_{V_x} = \frac{1}{4} \cdot n_e \cdot V_e \cdot \exp\left(-\frac{e \cdot U_3}{k \cdot T_e}\right).$$

Плотность электронного тока на зонд

$$J_{zt} = v_e \cdot e = e \cdot \frac{1}{4} \cdot n_e \cdot \overline{V_e} \cdot \exp\left(-\frac{e \cdot U_3}{k \cdot T_e}\right) = J_e \cdot \exp\left(-\frac{e \cdot U_3}{k \cdot T_e}\right)$$

где  $J_e$  – плотность беспорядочного (диффузионного) тока текущего через оболочку в положительный слой.

Логарифмируя это выражение, получаем

$$\ln J_{ze} = \ln J_e - \frac{e \cdot U_3}{k \cdot T_e}.$$

Данное уравнение показывает, что зависимость логарифма плотности электронного тока на зонд от потенциала зонда (при отрицательных относительно плазмы потенциалах) имеет линейный характер. Определить температуру электронного газа  $T_e$  можно построением зондовой характеристики в полулогарифмических координатах (рисунок 4).

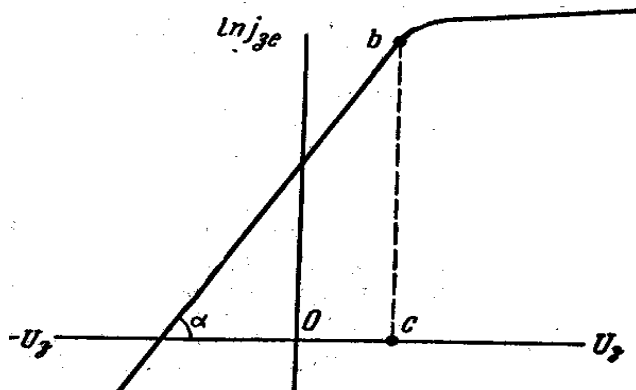


Рисунок 4 - Полулогарифмическая зондовая характеристика

Температура электронов определяется в зависимости от угла  $\alpha$  наклона прямой к оси абсцисс по формуле

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d \ln j_{ze}}{dU_3} = \frac{e}{kT_e},$$

где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  - заряд электрона;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$  - постоянная Больцмана.

Подставляя значения констант в выше написанное уравнение, можно найти температуру электронного газа:

$$T_e = \frac{11600}{\operatorname{tg} \alpha}$$

На практике логарифмируют значение не плотности электронного тока на зонд  $J_{ze}$ , а полный электронный ток на зонд  $I_{ze}$ . Кривая  $\ln I_{ze} = f(U_3)$  располагается параллельно кривой  $\ln J_{ze} = f(U_3)$  со сдвигом по оси ординат на величину  $S_3$ , а угол её наклона  $\alpha$  остаётся тем же. Таким

образом, соотношение для определения  $T_e$ , в которое вместо  $J_{ze}$  подставляют  $I_{ze}$  остаётся в силе.

Зная  $T_e$  и плотность беспорядочного электронного тока в плазме  $J_e$ , можно определить концентрацию электронов и равную ей концентрацию ионов по формуле:

$$n_e = n_i = 4,03 \cdot 10^{15} \cdot \frac{J_e}{\sqrt{T_e}}$$

### **Схема измерения одиночным зондом**

Принципиальная схема зондовых измерений приведена на рисунке 5. При измерениях зондового тока сопротивление  $B$  выбирается небольшим и ток определяется по показаниям вольтметра  $V_1$ . Сопротивление  $R$  определяет наклон нагрузочной прямой  $L_1$  на диаграмме рисунка 6. Если изменять смещение зонда, то точка пересечения этой линии с осью  $U$  сдвигается, и, измеряя ток, соответствующий точке пересечения  $L_1$  и  $A$ , можно проследить всю зондовую характеристику. Напряжение зонда при достаточно малом  $R$ , когда линия  $L_1$  гораздо ближе к вертикали, чем наиболее крутой участок характеристики  $A$ , можно измерять вольтметрами  $V_2$  или  $V_3$ . Плавающий потенциал  $V_f$  измеряется вольтметром  $V_3$ , при этом сопротивление  $R$  берётся большим, а источник напряжения  $B$  убирается. В этом случае нагрузочная прямая  $L_2$  должна идти достаточно близко к горизонтали, чтобы точка пересечения с кривой  $A$  находилась вблизи плавающего потенциала. Заметим, что если плавающий потенциал  $V_f$  сильно отличается от потенциала земли (как для кривой  $B$ ), то сопротивление  $R$  должно быть увеличено.



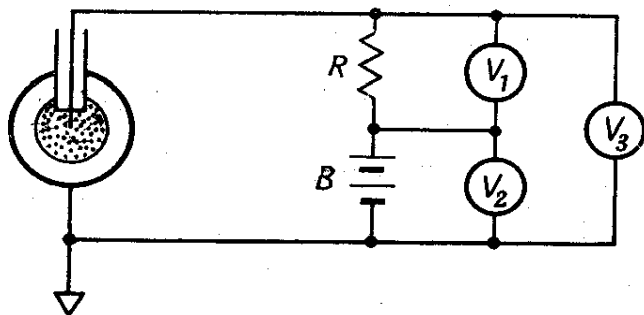


Рисунок 5. Простая схема зондовых измерений.

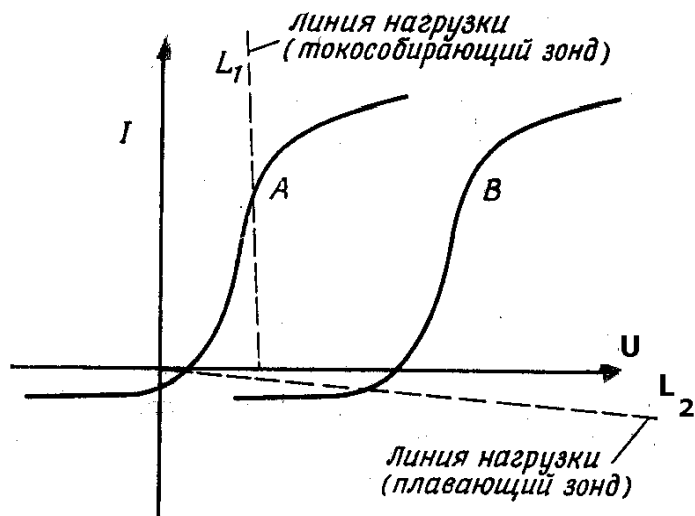


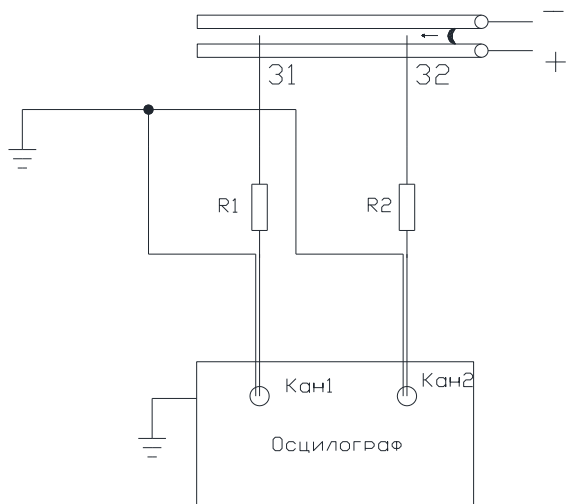
Рисунок 6. Диаграмма, иллюстрирующая взаимное положение нагрузочных линий внешней цепи и зондовой характеристики.

## Экспериментальное определение скорости движения дуги

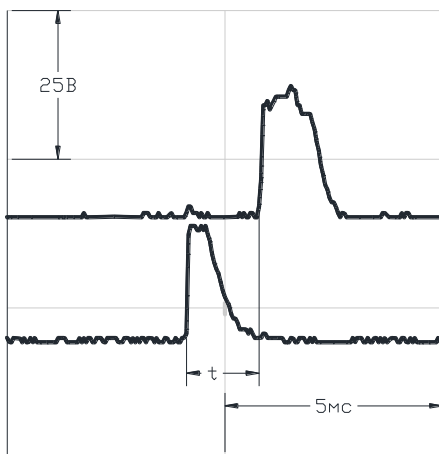
Одним из основных параметров характеризующих плазмотрон рельсотронного типа является скорость движения электрической дуги, так как она влияет на количество импульсов в единицу времени и определяет время воздействия плазмы на деталь.

Измерение скорости дуги проводилось с помощью 2 одиночных зондов методом непосредственной оценки (рисунок 7), которые регистрировали потенциал плазмы проходящей через них с помощью цифрового запоминающего осциллографа АСК-3117 (рисунок 8). Зная время прохождения дуги и расстояние между зондами можно вычислить скорость движения электрической дуги. Для защиты осциллографа используется делитель напряжения 1:10, НР9150. Для определения характера движения дуги одновременно производилась скоростная видеосъемка (1200 кад/с).

В результате экспериментальных исследований было выяснено, что на скорость движения дуги существенное влияние оказывают следующие факторы – это сила тока, диаметр электродов, межэлектродный зазор, расход плазмообразующего газа и материал электродов. Данные, полученные в результате экспериментальных исследований, представлены в виде графиков на рисунках 9 -10.



**Рисунок 7. Схема измерения скорости движения дуги; 31 и 32 – одиночные зонды, R1 и R2-добавочные сопротивления**



**Рисунок 8. Осциллограммы полученные с зондов, электроды из меди,  $d=4,5\text{мм}$ ,  $L=4\text{мм}$ ,  $I=250\text{А}$ , расстояние между зондам  $L_3=200\text{мм}$**

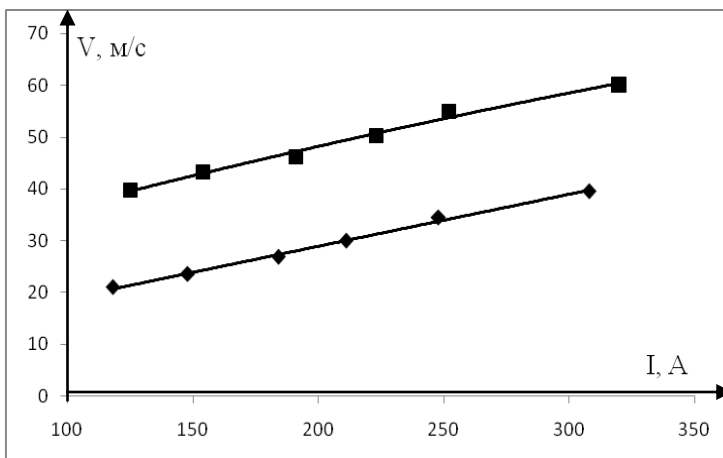


Рисунок 9. Зависимость скорости движения дуги от тока при  $d=4\text{мм}$ ,  $L=4\text{мм}$ ,  $G=0\text{л/мин}$ ; ■—медь МТ; ◆—сталь 20

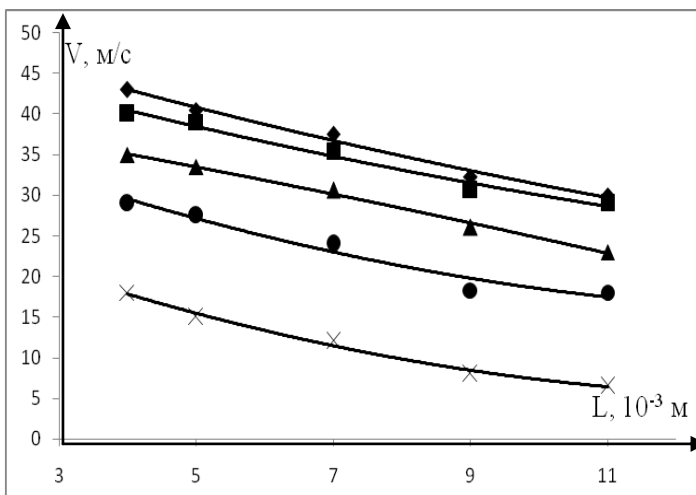


Рисунок 10. Зависимость скорости движения дуги от межэлектродного расстояния при  $d=6\text{мм}$ ,  $G=0\text{л/мин}$ ; ◆— $R_B=0,28\text{Ом}$ ; ■— $R_B=0,30\text{Ом}$ ; ▲— $R_B=0,35\text{Ом}$ ; ●— $R_B=0,525\text{Ом}$ ; ×— $R_B=1,05\text{Ом}$

### **Порядок выполнения работы.**

1. Перед началом работы пройти инструктаж по технике безопасности.
2. Ознакомиться с устройством и принципом действия экспериментальной плазменной установки и дать её краткое описание с указанием основных параметров.
3. Включить установку.
4. По заданию преподавателя произвести измерения скорости движения электрической дуги, температуры и концентрации электронов.
5. При определении параметров плазмы воспользоваться вышеописанными формулами. Расчёты занести в протокол.

### **Контрольные вопросы.**

1. Какие параметры плазмы можно измерить с помощью электрических зондов?
2. Двумерное и трёхмерное представления различных режимов работы зонда.
3. Принцип измерения «одиночным» зондом.
4. Дайте описание ВАХ одиночного электрического зонда.
5. Порядок определения температуры и концентрации заряженных частиц в методе одиночного зонда.
6. Порядок определения скорости движения электрической дуги.
7. Что такое диагностика плазмы?

## Список литературы

1. Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы [Электронный ресурс]: Учебное пособие / Д.А. Франк-Каменецкий. - 3-е изд. - Долгопрудный: Интеллект, 2008. - 280 с. - ISBN 978-5-91559-002-0. Режим доступа: <http://znanium.com/bookread2.php?book=167506>
2. Чукбар К.В. Лекции по явлениям переноса в плазме плазмы [Электронный ресурс]: Учебное пособие / К.В. Чукбар. - Долгопрудный: Интеллект, 2008. - 256 с. - ISBN 978-5-91559-015-0. Режим доступа: <http://znanium.com/bookread2.php?book=185378>
3. Брушлинский К.В. Математические основы вычислительной механики жидкости, газа и плазмы [Электронный ресурс]: Учебное пособие / Брушлинский К.В. - Долгопрудный: Интеллект, 2017. - 272 с. - ISBN 978-5-91559-224-6. Режим доступа: <http://znanium.com/bookread2.php?book=858951>
4. Чередниченко В.С. Плазменные электротехнологические установки [Электронный ресурс]: Уч. для вуз / В.С.Чередниченко, А.С.Аньшаков, М.Г.Кузьмин; Под ред. В.С.Чередниченко. - 3 изд, испр. и доп. - Новосиб: НГТУ, 2011 - 602 с. - ISBN 978-5-7782-1576-4. Режим доступа: <http://znanium.com/bookread2.php?book=479932>
5. Райзер Ю.П. Физика газового разряда [Электронный ресурс] / Ю.П. Райзер. - 3-е изд., перераб. и доп. - Долгопрудный: Интеллект, 2009. - 736 с. ISBN 978-5-91559-019-8. Режим доступа: <http://znanium.com/bookread2.php?book=210610>
6. Астапенко В.А. Электромагнитные процессы в среде, наноплазмоника и метаматериалы [Электронный ресурс]: Учебное пособие / В.А. Астапенко. - Долгопрудный: Интеллект, 2012. - 584 с. ISBN 978-5-91559-111-9. Режим доступа: <http://znanium.com/bookread2.php?book=365083>

7. Ильин А.А. Вакуумная ионно-плазменная обработка [Электронный ресурс]: Учебное пособие / А.А. Ильин, В.В. Плихунов, Л.М. Петров и др. - М.: Альфа-М: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 160 с. ISBN 978-5-98281-366-4. Режим доступа: <http://znanium.com/bookread2.php?book=426490>
8. Иванов И. Газовый разряд и его применение в фотонике [Электронный ресурс]: учебное пособие / Иванов И. - Ростов-на-Дону: Издательство ЮФУ, 2009. - 96 с. - ISBN 978-5-9275-0613-2. Режим доступа: <http://znanium.com/bookread2.php?book=553551>
9. Ключарев А.Н. Элементарные процессы и ионизационные явления в газовых средах [Электронный ресурс]: Учебное пособие / Ключарев А.Н., Безуглов Н.Н. - СПб:СПбГУ, 2013. - 244 с.: ISBN 978-5-288-05454-9. Режим доступа:

---

Подписано в печать \_\_\_\_\_  
Формат 60x84/16    Бумага офсетная    Печать ризографическая  
Уч.-изд.л. 1,9    Усл.-печ.л. 1,9    Тираж 50 экз.

Заказ \_\_\_\_\_  
Издательско-полиграфический центр  
Набережночелнинского института  
Казанского (Приволжского) федерального университета

---

423810, г. Набережные Челны, Новый город, проспект Мира, 68/19  
тел./факс (8552) 39-65-99 e-mail: ic-nchi-kpfu@mail.ru