

Работа 3.5.1

Изучение плазмы газового разряда в неоне

Пунов Дмитрий Викторович

Группа Б03-105

20 сентября 2022

г. Долгопрудный

## **Аннотация**

В работе исследован газовый разряд в неоне. Получены ВАХ двойного и одиночного зонда. Получены следующие параметры плазмы: температура, плазменная частота, радиус Дебая, среднее число ионов в дебаевской сфере.

# Список обозначений и сокращений

ВАХ – вольт-амперная характеристика

ВИП – высоковольтный источник питания

$E$  – электрическое поле

$I_{eH}$  – электронный ток насыщения

$\omega_p$  – плазменная частота

$r_D$  – радиус дебаевской сферы

$N_D$  – среднее число ионов в дебаевской сфере

$\rho_{e/i}$  – плотность заряда электронов/ионов

$U_f$  – свободный потенциал

$T_e$  – температура электронов

# Введение

Плазма по своим характеристикам значительно отличается от обычного газа. Например, такие характерные свойства, как высокая электропроводность и квазинейтральность, требуют введения дополнительных параметров для описания состояния плазмы. Также, ввиду наличия большого числа подвижных заряженных частиц плазма, в противоположность нейтральному газу, сильно взаимодействует с электрическими и магнитными полями. В данной работе рассматриваются основные методы нахождения таких параметров плазмы и их вычисления.

## Методика измерений

Измерения проводились с помощью двойного и одиночного зондов. Двойной зонд - система из двух одинаковых зондов, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга, между которыми создаётся разность потенциалов, меньшая  $U_f$ . Одиночный зонд (рис.1) - уединённый проводник с потенциалом, изначально равным потенциалу плазмы в точке, в которую его помещают.

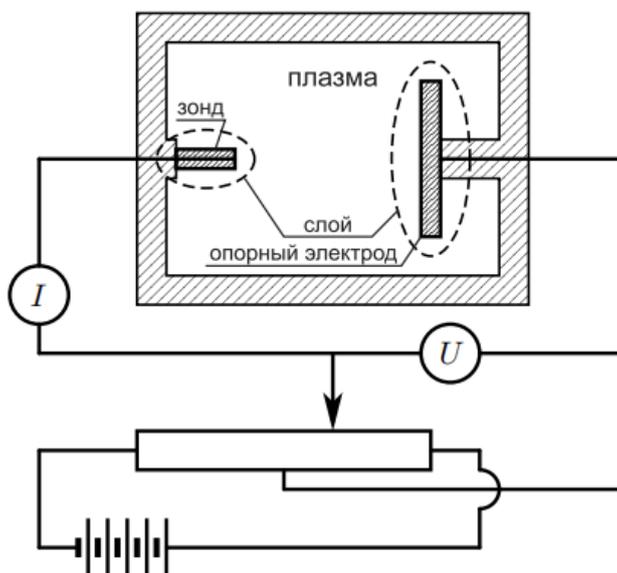


Рисунок 1. Одиночный зонд

В равновесии ионный ток мало меняется, а электронный имеет вид

$$I_e = I_0 \exp\left(-\frac{eU_f}{kT_e}\right) \quad (1)$$

Формулы для разности потенциалов и тока двойного зонда, полученные теоретически:

$$U = \frac{kT_e}{e} \ln\left(\frac{1 - I/I_{iH}}{1 + I/I_{iH}}\right), I = I_{iH} th \frac{eU}{2kT_e} \quad (2)$$

Реальная зависимость потенциалов и тока двойного зонда описывается формулой:

$$I = I_{iH} th \frac{eU}{2kT_e} + AU. \quad (3)$$

Данная зависимость изображена на графике 2:

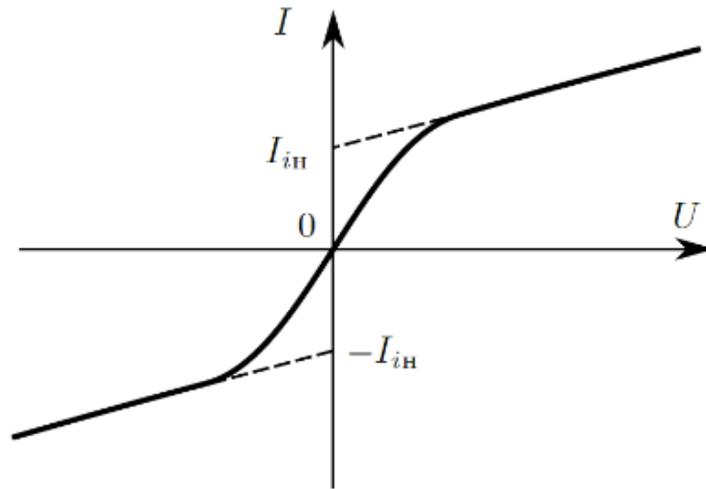


Рисунок 2. График зависимости потенциалов и тока двойного зонда

Из формулы (3) можно найти формулу для  $T_e$ :

$$kT_e = \frac{1}{2} \frac{eI_{iH}}{\left. \frac{dI}{dU} \right|_{U=0}} \quad (4)$$

## Основные формулы, используемые при расчётах

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}}$$

$$r_{De} = \sqrt{\frac{k_B T_e}{4\pi n_e e^2}}$$

$$r_{De} = \sqrt{\frac{k_B T_e T_i}{4\pi n_e e^2 (T_e + T_i)}}$$

## Описание установки

Стеклянная газоразрядная трубка имеет холодный (не накаливаемый) полый катод, три анода и гетерный узел - стеклянный баллон, на внутреннюю поверхность которого напылена газопоглощающая плёнка. Трубка наполнена изотопом неона  $^{22}\text{Ne}$  при давлении 2 мм рт. ст. Катод и один из анодов (I и II) с помощью переключателя  $\Pi_1$  подключается через балластный резистор  $R_6$  ( $\approx 450\text{кОм}$ ) к регулируемому ВИП с выходным напряжением до 5 кВ.

При подключении к ВИП анода-II разряд возникает в пространстве между катодом и анодом-II, где находятся двойной зонд, используемый для диагностики плазмы положительного столба. Зонды изготовлены из молибденовой проволоки диаметром  $d = 0.2$  мм и имеют длину  $l = 5.2$  мм. Они подключены к источнику питания GPS через

потенциометр  $R$ . Переключатель  $\Pi_2$  позволяет изменять полярность напряжения на зондах. Величина напряжения на зондах изменяется с помощью дискретного переключателя  $V$  выходного напряжения источника питания и потенциометра  $R$ , а измеряется цифровым вольтметром  $V_2$ . Для измерения зондового тока используется мультиметр  $A_2$ .

Анод-III в работе не используется.

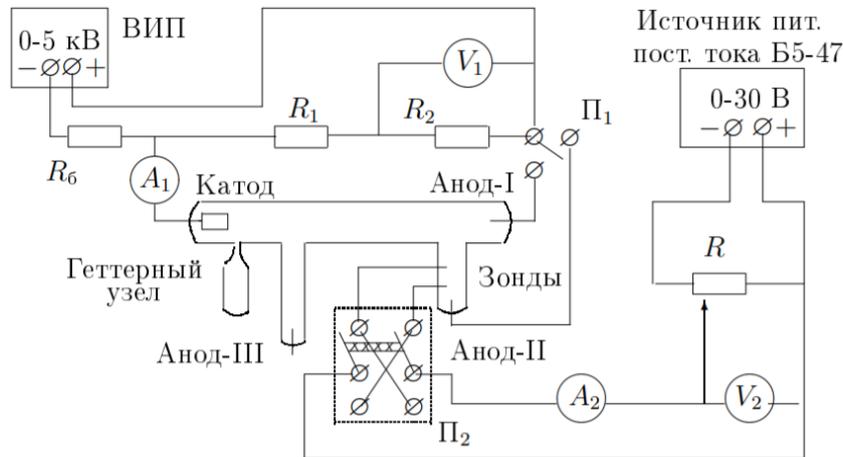


Рисунок 3. Схема лабораторной установки

## Результаты измерений и обработка данных

С помощью вольтметра  $V_1$  и амперметра  $A_1$  измерили ВАХ разряда  $I_p(U_p)$ . Ток разряда изменяли в диапазоне от 0,5 мА до 5 мА. Результаты измерений изображены на графике 4.

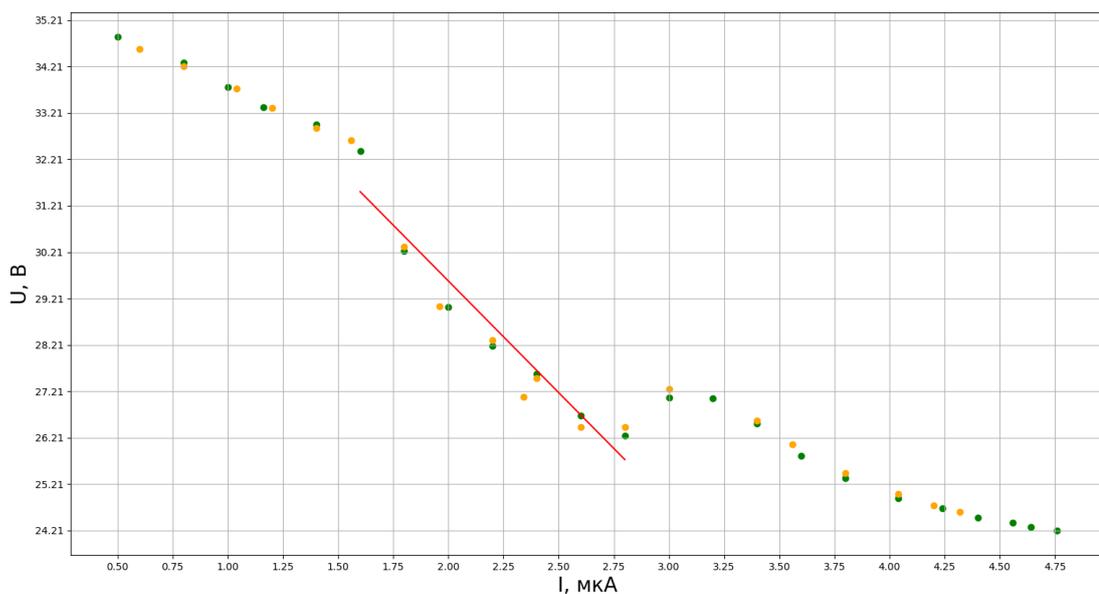


Рисунок 4. ВАХ разряда  $I_p(U_p)$ .

По наклону определили максимальное сопротивление заряда:  $39212 \pm 4812 \text{ Ом}$

С помощью вольтметра  $V_2$  и амперметра  $A_2$  сняли ВАХ двойного зонда  $I_2 = f(U_2)$  при фиксированном токе разряда  $I_p$  в трубке в диапазоне  $-25 \div 25 \text{ В}$ . Измерения провели для  $I_p = 5 \text{ мА}$ ,  $I_p = 3 \text{ мА}$ ,  $I_p = 1,5 \text{ мА}$ . Результаты отображены в таблице 2. (Приложения)

Отцентрированные графики представлены в Приложении ( $I_0 = \frac{1}{2} \sum I$ ):

Определили концентрации ионов и электронов, считая их равными. Рассчитали плазменную частоту  $\omega_p$ , радиус Дебая  $r_D$ , а также среднее число ионов в дебаевской сфере  $N_D$ .

$I, \text{мА}$	$T_e, \text{эВ}$	$n_i, 10^{13}, \text{м}^{-3}$	$\omega, 10^5 \text{рад/с}$	$r_{De}, \text{м}^{-5}$	$r_D, \text{м}^{-5}$	$\langle N_D \rangle, 10^6$	$\alpha, 10^{-7}$
5,00	$5,01 \pm 0,25$	$5,9 \pm 0,3$	$4,3 \pm 0,2$	$1,9 \pm 0,1$	$1,4 \pm 0,1$	$2,3 \pm 0,1$	$93 \pm 4$
3,00	$3,24 \pm 0,25$	$3,3 \pm 0,3$	$3,2 \pm 0,2$	$2,7 \pm 0,1$	$1,9 \pm 0,1$	$3,1 \pm 0,1$	$53 \pm 4$
1,50	$5,07 \pm 0,25$	$1,4 \pm 0,3$	$2,1 \pm 0,2$	$3,8 \pm 0,1$	$2,9 \pm 0,1$	$4,7 \pm 0,1$	$23 \pm 4$

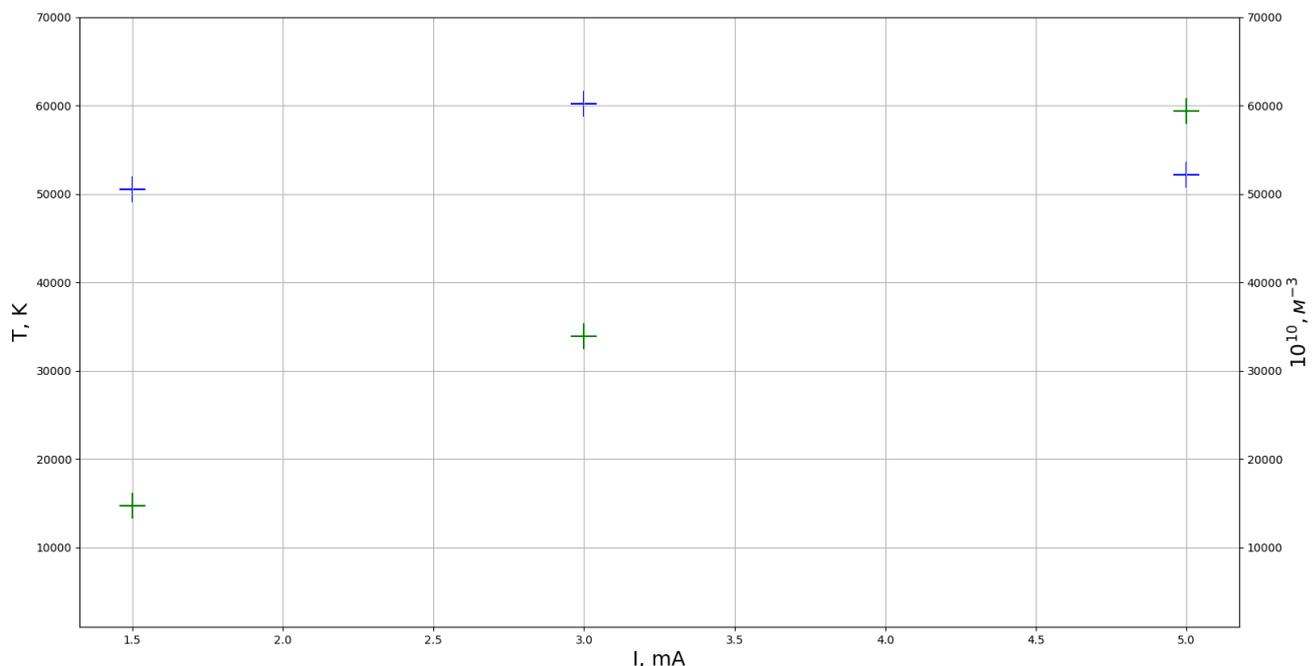


Рисунок 5. Зависимость температуры и концентрации электронов от тока разряда в плазме неона

## Обсуждение результатов

- 1) Из сравнения ВАХ разряда (Приложение рис.4) и графика ВАХ газового разряда очевидно, что рассматривался участок, соответствующий поднормальному тлеющему разряду
- 2) Из оценки числа электронов в дебаевской сфере, можно сделать вывод что плазму можно называть идеальной и квазинейтральной

## Вывод

В ходе работы подтверждена теоретическая зависимость  $I = I_{in} th \frac{eU}{2kT_e} + AU..$

Полученные результаты совпадают с табличными для плазмы газового разряда

## Список литературы

- 1) Никулин. М.Г., Попов П.В., Нозик А.А. Лабораторный практикум по общей физике : учеб. пособие в трёх томах. Т. 2. Электричество и магнетизм. - 2-е изд. – М.: МФТИ, 2019. - 370 с.
- 2) Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы. - 3-е изд. - Долгопрудный: Издательский Дом "Интеллект", 2008. - 280 с.
- 3) Сивухин Д.В. Электричество. - 4-е изд. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. - 656 с.

# Приложения

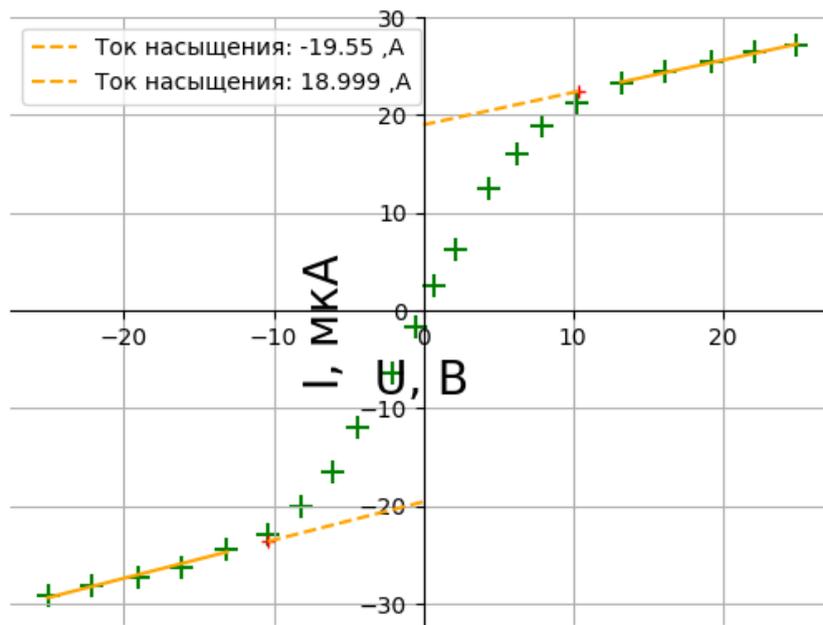


Рисунок 1. ВАХ двойного зонда (1,5 мА)

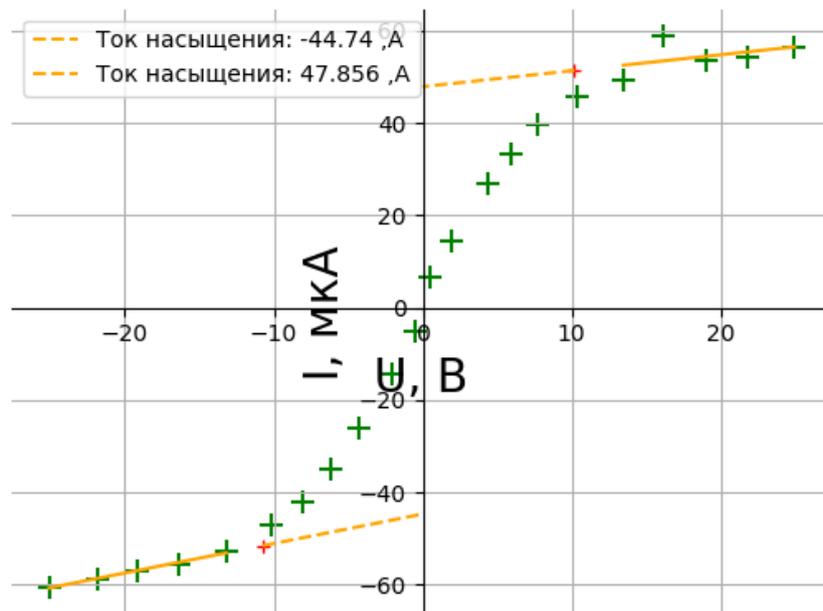


Рисунок 2. ВАХ двойного зонда (3 мА)

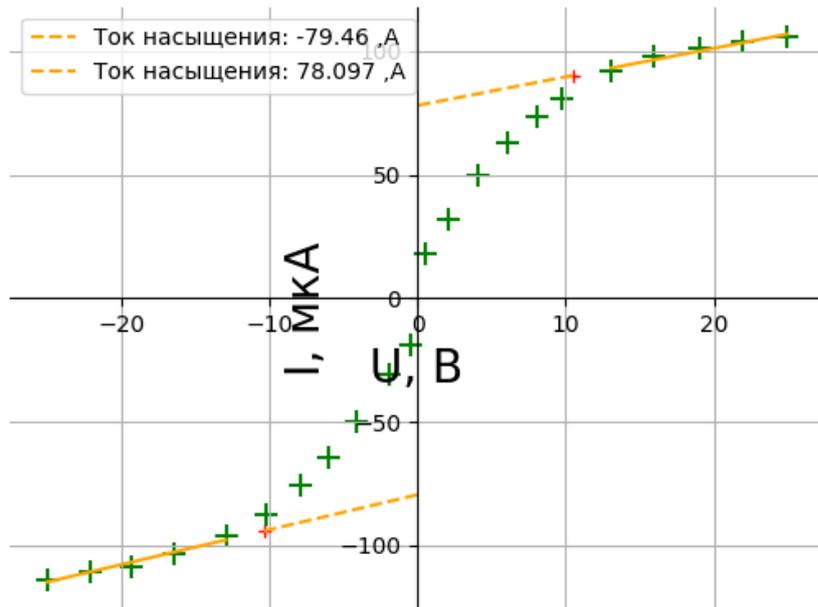


Рисунок 3. ВАХ двойного зонда (5 мА)

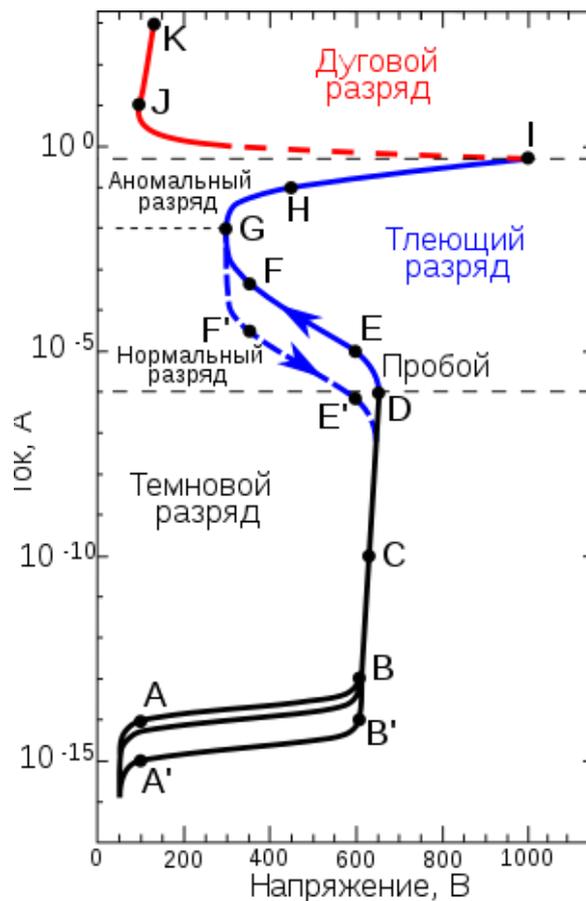


Рисунок 4. ВАХ разряда при давлении 1 мм. рт. ст. (A, A': случайные импульсы, вызванные ионизирующим излучением от естественной радиоактивности и космического излучения; A—B: ток насыщения от естественной ионизации; B—C: темновой лавинный разряд Таунсенда; C—D: самостоятельный разряд Таунсенда; E, E': область неустойчивости, коронный разряд; E—F: субнормальный тлеющий разряд; G: граница нормального тлеющего разряда; H: аномальный тлеющий разряд; I: нестабильная область,

переход тлеющего разряда в дуговой разряд; J: дуговой разряд с отрицательным дифференциальным сопротивлением; K: развитая электрическая дуга.)

$V_1, B$	$I_1, mA$	$V_1, B$	$I_1, mA$
34,85	0,5	24,37	4,56
34,3	0,8	24,61	4,32
33,76	1	24,75	4,2
33,33	1,16	24,99	4,04
32,96	1,4	25,45	3,8
32,39	1,6	26,07	3,56
30,24	1,8	26,57	3,4
29,02	2	27,09	2,34
28,19	2,2	27,26	3
27,59	2,4	26,43	2,8
26,69	2,6	26,44	2,6
26,25	2,8	27,49	2,4
27,08	3	28,31	2,2
27,06	3,2	29,04	1,96
26,51	3,4	30,33	1,8
25,82	3,6	32,62	1,56
25,33	3,8	32,88	1,4
24,91	4,04	33,32	1,2
24,68	4,24	33,74	1,04
24,48	4,4	34,22	0,8
24,29	4,64	34,59	0,6

Таблица 1. ВАХ одиночного зонда

$I_p, mA$	$V_2, B$	$I_2, mA$	$I_p, mA$	$V_2, B$	$I_2, mA$	$I_p, mA$	$V_2, B$	$I_2, mA$
5	24,98	105,85	3	24,98	56,46	1,5	24,98	27,17
	21,94	103,84		21,78	54,35		22,20	26,39
	19,09	101,27		19,03	53,45		19,30	25,41
	16,00	97,68		16,18	58,73		16,15	24,39
	13,10	91,76		13,00	49,26		13,22	23,29
	9,74	80,93		10,41	45,80		10,24	21,32
	8,10	73,68		7,77	39,75		7,97	18,88
	6,12	62,93		5,96	33,40		6,22	15,96
	4,10	49,76		4,39	26,79		4,39	12,55
	2,10	32,23		1,92	14,53		2,14	6,32
	0,50	18,01		0,55	6,48		0,69	2,60
	-25,00	-113,54		-25,10	-60,56		-25,10	-29,19
	-22,05	-110,88		-21,87	-58,70		-22,12	-28,19
	-19,31	-108,29		-19,14	-57,05		-19,07	-27,20
	-16,39	-103,44		-16,40	-55,78		-16,13	-26,18
	-12,91	-96,33		-13,20	-52,70		-13,12	-24,34
	-10,23	-87,22		-10,12	-47,06		-10,42	-22,97

Таблица 2. ВАХ двойного зонда