

# Лабораторная работа 2.4.1

## Измерение магнитного поля Земли

Выполнил Жданов Елисей Б01-205

### 1 Цель работы:

Изучение вольт-амперной характеристики тлеющего разряда

Изучение свойств плазмы методом зондовых характеристик

### 2 Оборудование:

Стеклянная газоразрядная трубка, наполненная неоном

Высоковольтный источник питания

Источник питания постоянного тока

Делитель напряжения

Резистор

Потенциометр

Амперметры

Вольтметры

Переключатели

### 3 Теоретическая справка

В данной работе рассматриваются стационарные распределения Больцмана и остальных параметров.

Используя формулу потока частиц, можно получить полуэмпирическую формулу Бома

$$I_{\text{ин}} = 0.4 n_e e S \sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}}$$

Плазменная частота колебаний электронов выводится из уравнения колебаний среды

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

Через такую плазму проходят частоты  $\omega > \omega_p$ , иные просто от нее отражаются.

Записав отношение скорости электронов к частоте, можно получить характерный масштаб, в котором не выполняется квазинейтральность плазмы

Таким образом, записав его для электронов и ионов, можно получить электронную поляризационную длину

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

и дебаевский радиус экранирования

$$r_D = \sqrt{\frac{kT_i}{4\pi n_e e^2}}$$

Среднее же число ионов в дебаевской сфере

$$N_D = \frac{4}{3}\pi r_D^3 n_i$$

Наконец, степень ионизации плазмы

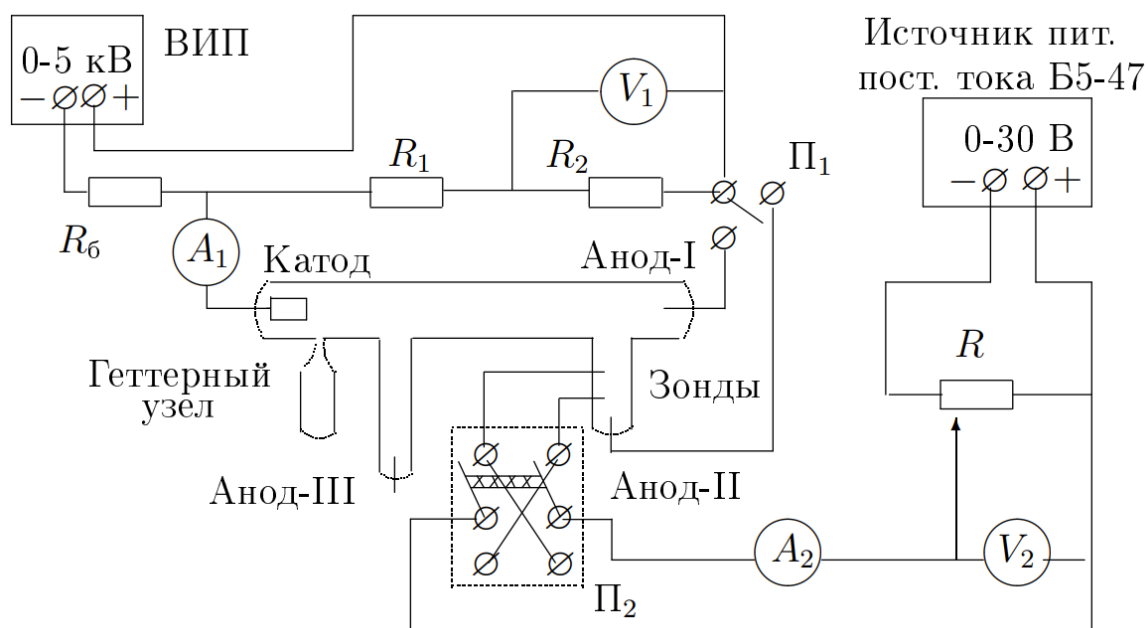
$$\alpha = \frac{n_i}{n}$$

## 4 Экспериментальная установка

Схема установки для исследования плазмы газового разряда в неоне представлена на рисунке. Стеклообразная газоразрядная трубка имеет холодный (ненагреваемый) полый катод, три анода и геттерный узел стеклянный баллон, на внутреннюю поверхность которого напылена газопоглощающая плёнка (геттер). Трубка наполнена изотопом неона  $^{22}\text{Ne}$  при давлении 2 мм рт. ст.

Катод и один из анодов (I или II) с помощью переключателя  $\Pi_1$  подключаются через балластный резистор  $R_6$  (450 кОм) к регулируемому высоковольтному источнику питания (ВИП) с выходным напряжением до 5 кВ.

При подключении к ВИП анода-I между ним и катодом возникает газовый разряд. Ток разряда измеряется миллиамперметром  $A_1$ , а падение напряжения на разрядной



трубке цифровым вольтметром  $V_1$  (мультиметром GDM), подключённым к трубке через высокоомный (25 МОм) делитель напряжения с коэффициентом  $(R_1 + R_2)/R_2 = 10$ .

При подключении к ВИП анода-II разряд возникает в про транстве между катодом и анодом-II, где находится 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  $V_2$  (GDM). Для измерения зондового тока используется мультиметр  $A_2$  (GDM). Анод-III в нашей работе не используется.

## 5 Измерения, Обработка

При обработке считается, что доминирующий вклад в погрешность вносит случайный разброс величин, а погрешностью измерения приборов можно пренебречь(что в результате будет очевидно).

### Вольт - амперная характеристика разряда и теоретический график ВАХ

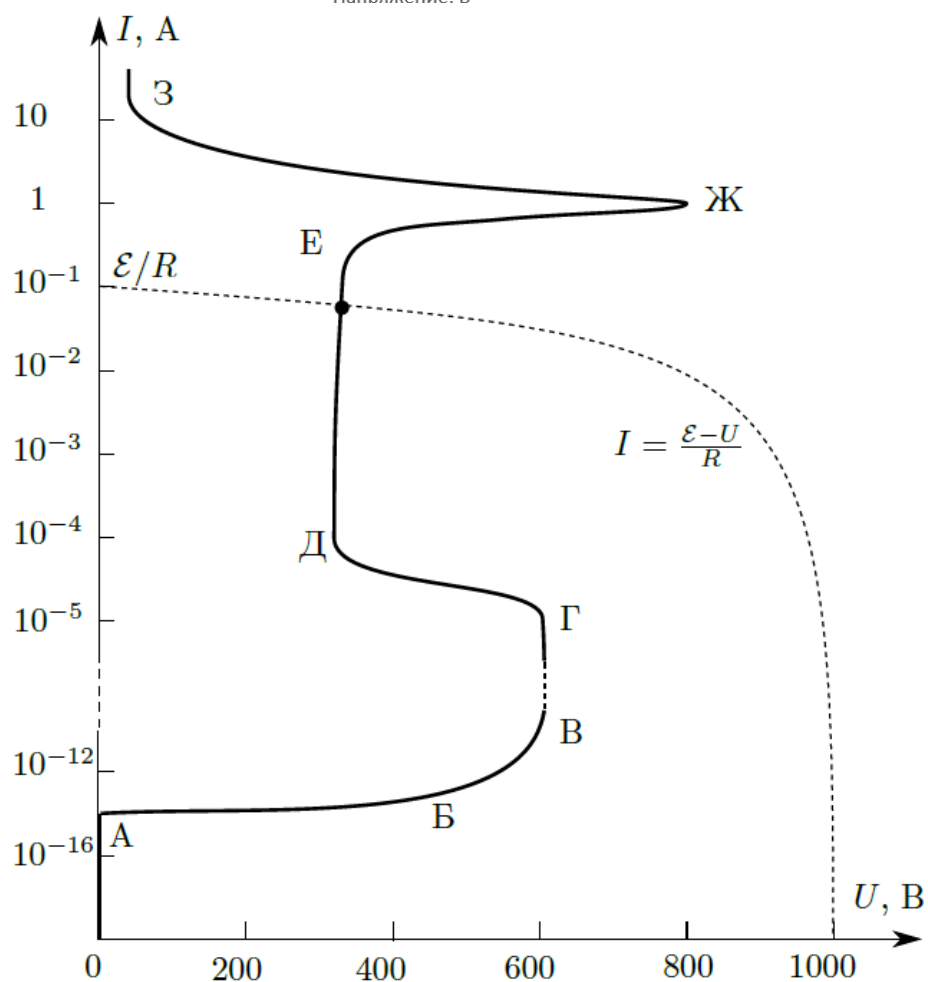
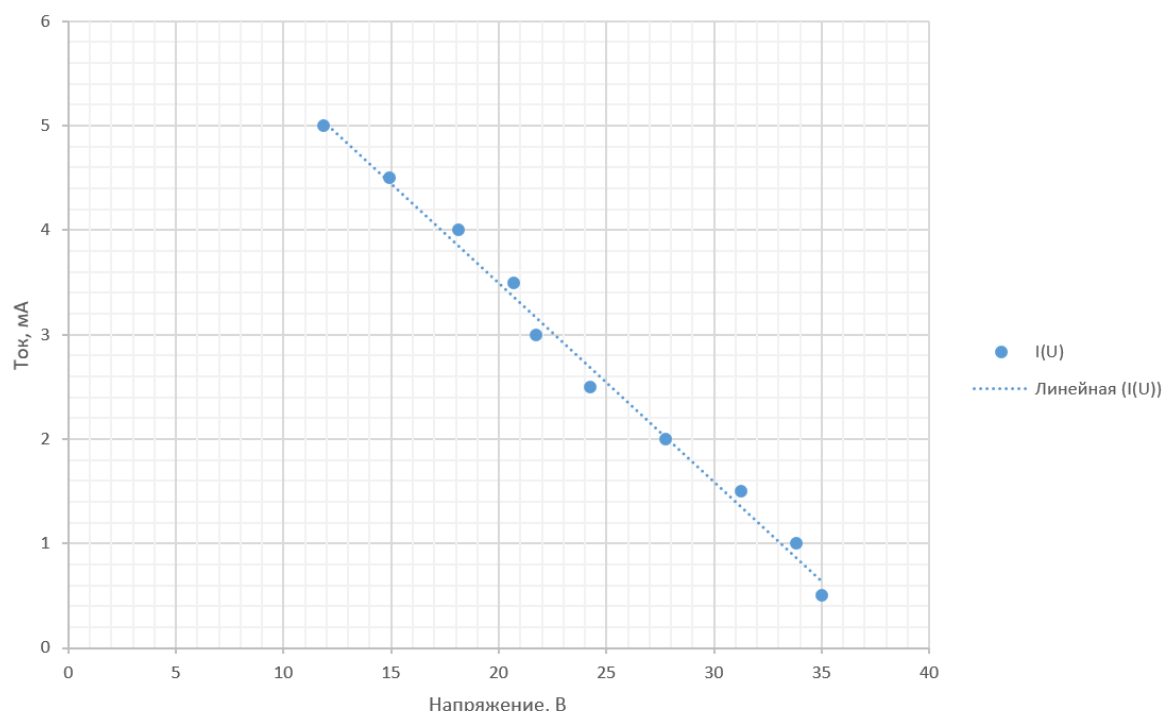


Рис. 6. Вольт-амперная характеристика разряда в неоне при давлении 1 тор. Шкала по оси ординат — логарифмическая. Пунктиром изображён пример нагрузочной прямой, соответствующей режиму нормального тлеющего разряда ( $R = 10$  кОм,  $\mathcal{E} = 1$  кВ)

Найдем угловые коэффициент ВАХ по МНК.

$$y = (7.3 \pm 0.15) - (0.1902 \pm 0.0061) \cdot x$$

$$a = \frac{\langle x_i y_i \rangle - \langle x \rangle \langle y_i \rangle}{\langle x_i^2 \rangle - \langle x_i \rangle^2}$$

$$b = \langle y_i \rangle - a \langle x_i \rangle$$

Также рассчитаем их погрешности

$$S_a^2 = \frac{\langle x_i^2 \rangle}{\langle x_i^2 \rangle - \langle x_i \rangle^2} \cdot \frac{\langle b_i - b \rangle^2}{n - 2}$$

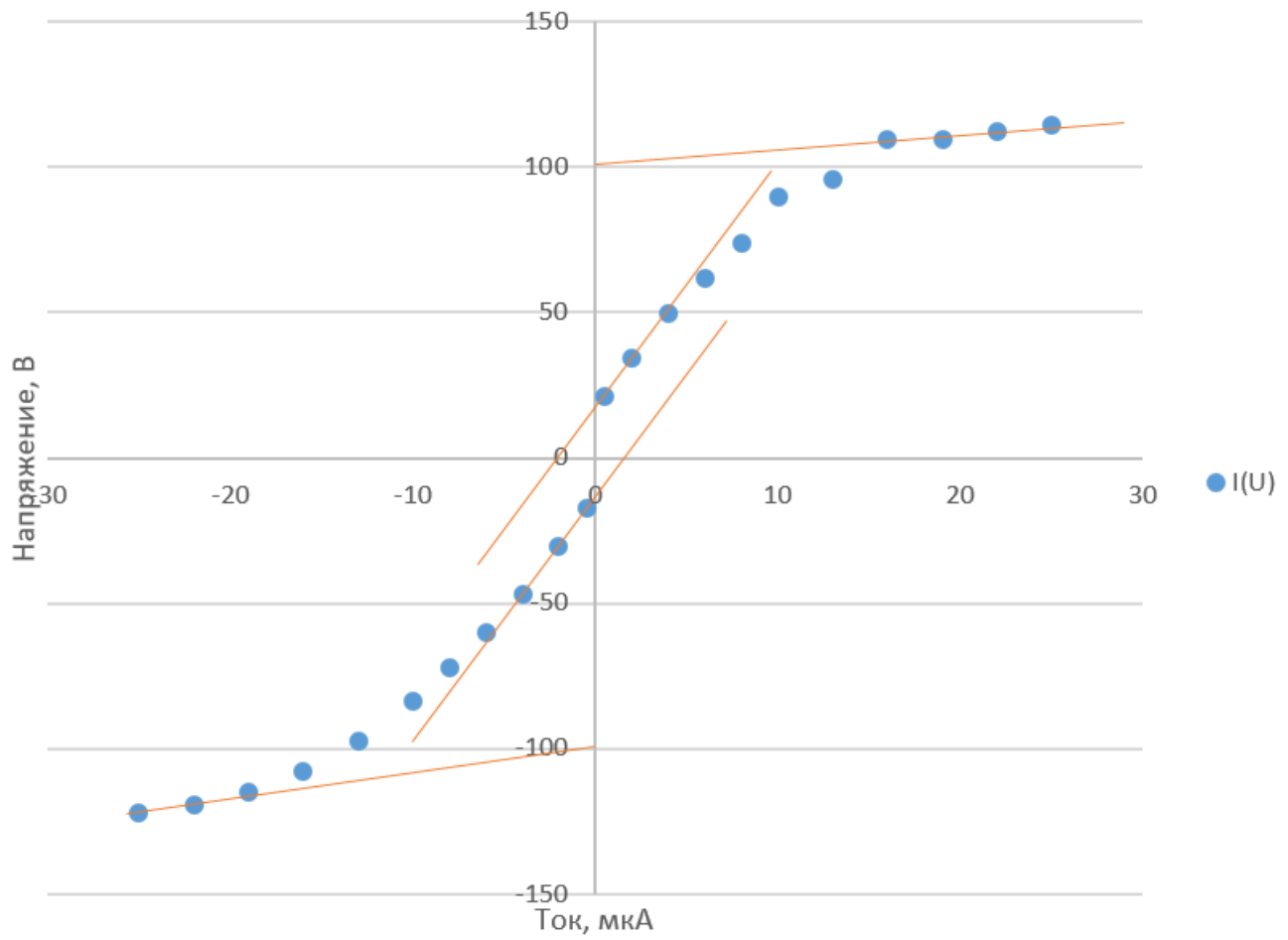
$$\text{Итого } R_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI} = \frac{1}{a} = -5.26 \pm 0.16 \text{ Ом}$$

Как видим, поскольку наклон ВАХ отрицательный, сопротивление того же знака.

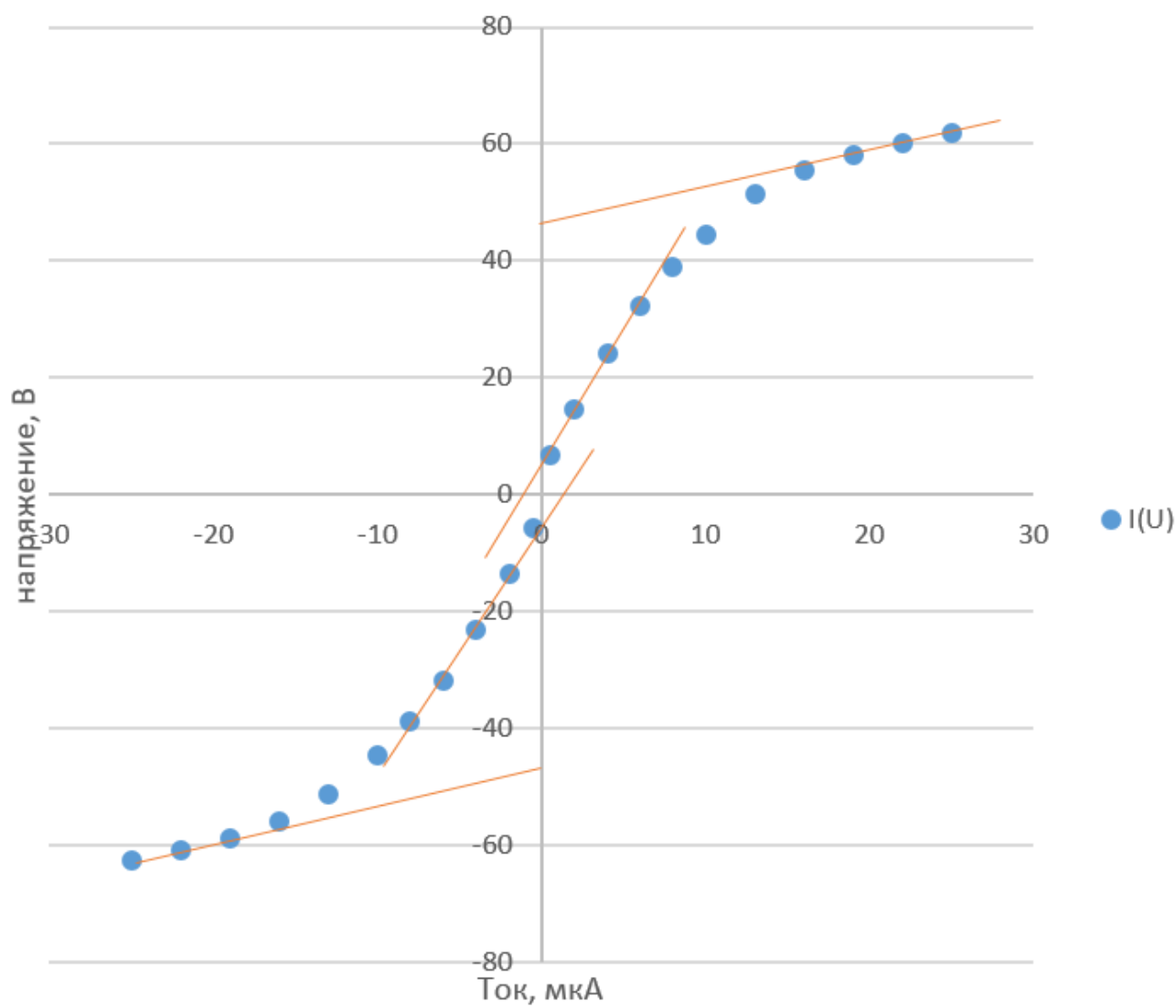
Очевидно, что ВАХ соответствует теоретическому участку ГД, правда ток в рассматриваемой установке значительно выше.

Графики зондовых характеристик

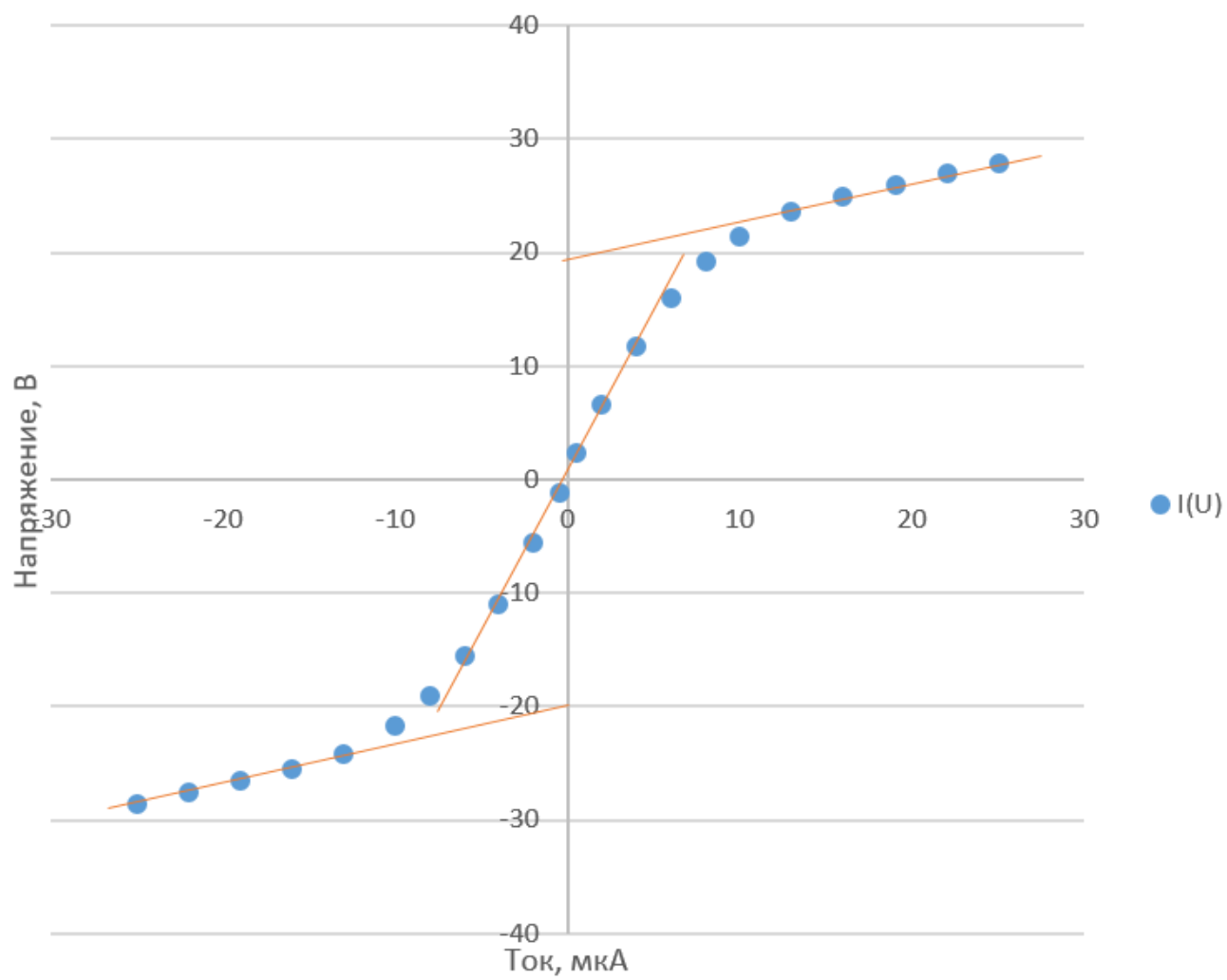
$I(U)$  зонда,  $I_p = 5\text{ мА}$



$I(U)$  зонда,  $I_p = 3\text{ мА}$



$I(U)$  зонда,  $I_p = 1.5\text{мА}$





При помощи МНК построим требуемые асимптоты и касательные, получив необходимые значения, которые сведены в таблицу. Добавим расчет  $\Delta U$

$I_p$ , мА	$I_{iH}$ , мкА	$\frac{dI}{dU}_{U=0}$	$\Delta U$ , В
5	$(93 \pm 3)$	$(8.2 \pm 0.4)$	$(11.3 \pm 1.0)$
3	$(46.8 \pm 0.6)$	$(4.95 \pm 0.12)$	$(9.5 \pm 0.4)$
1.5	$(20.23 \pm 0.13)$	$(2.74 \pm 0.11)$	$(7.4 \pm 0.4)$

Рассчитаем все требуемые величины в следующей таблице на основе  $\Delta U$ .

$I_p$ , мА	$\Delta U$ , В	$kT_e$ , эВ	$T_e$ , $10^3$ К	$n_e$ , $10^{16} \text{ м}^{-3}$	$\omega_p$ , $10^9 \frac{\text{рад}}{\text{сек}}$	$r_{De}$ , мкм	$r_D$ , мкм
5	$11.3 \pm 1.0$	$5.6 \pm 0.5$	$67 \pm 6$	$6.3 \pm 0.5$	$14.2 \pm 0.6$	$70 \pm 6$	$4.8 \pm 0.2$
3	$9.5 \pm 0.4$	$4.8 \pm 0.2$	$56 \pm 2$	$3.45 \pm 0.11$	$10.48 \pm 0.17$	$88 \pm 3$	$6.44 \pm 0.11$
1.5	$7.4 \pm 0.4$	$3.7 \pm 0.2$	$44 \pm 2$	$1.68 \pm 0.05$	$7.31 \pm 0.11$	$110 \pm 5$	$9.22 \pm 0.14$

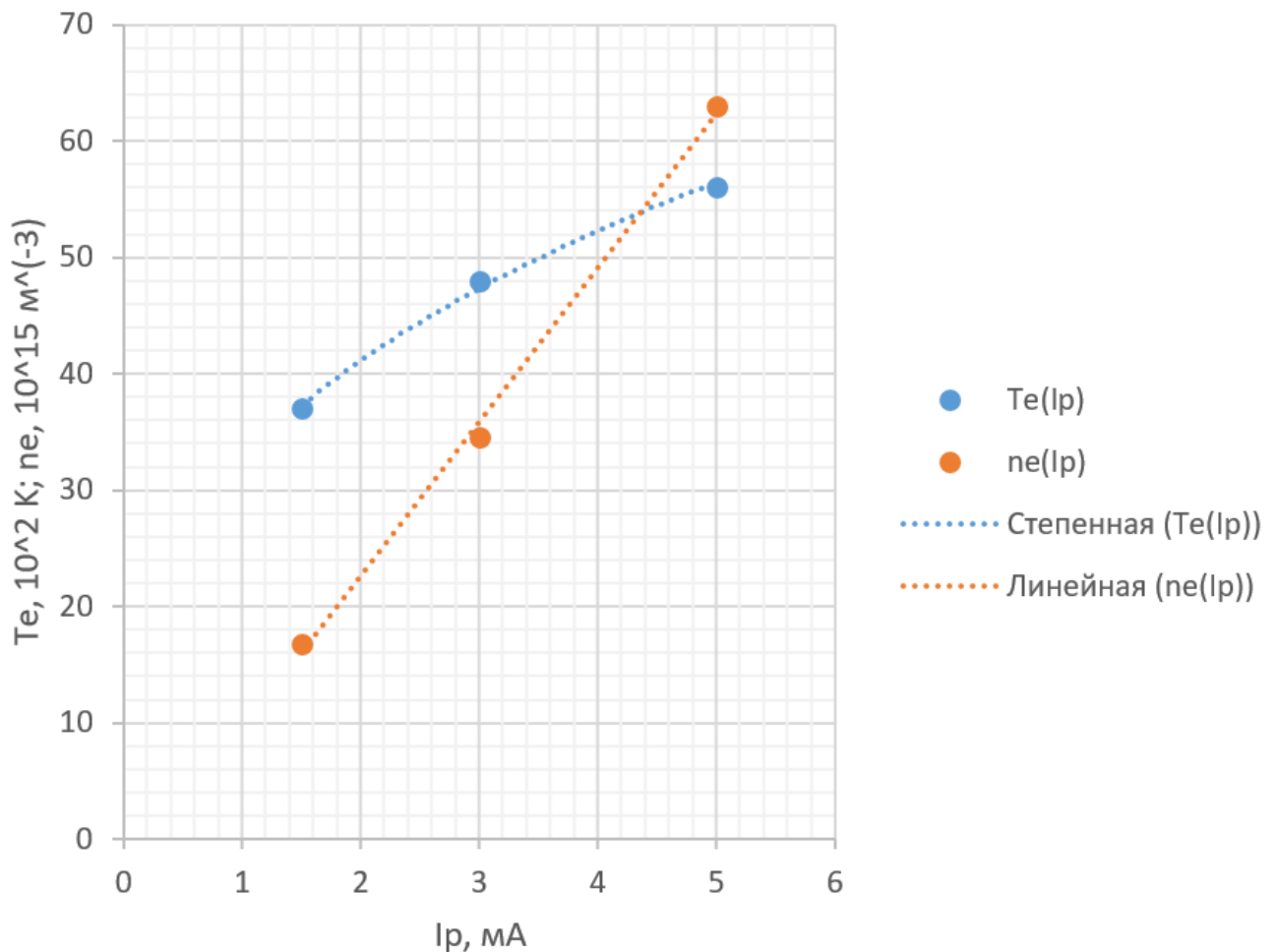
$I_p$ , мА	$N_D$	$\alpha$ , $10^{-7}$
5	$29 \pm 6$	$9.8 \pm 0.8$
3	$39 \pm 3$	$5.36 \pm 0.17$
1.5	$55 \pm 4$	$2.61 \pm 0.08$

Поскольку  $r_{De}$  много меньше миллиметра, что все еще много меньше её линейных размеров, плазму можно считать квазинейтральной.

Число Дебая также довольно большое по сравнению с единицей, поэтому плазму можно рассматривать как идеальный газ.

Следовательно, все теоретические выкладки оправданны, и эксперимент можно считать корректным.

Построим графики  $T_e(I_p)$  и  $n_e(I_p)$



Собственно говоря, на приведенных графиках ничего нового не наблюдается - температурная зависимость аппроксимируется коренной функцией  $\sqrt{x}$ , а зависимость концентрации прямо пропорциональна. Это замечательно согласуется с уже приведенными теоретическими выкладками

## 6 Вывод

В данной работе было исследовано множество характеристик тлеющего разряда в неоне при пониженном давлении. Фактически все полученные значения величин обладают небольшой погрешностью, лежат в рамках предположений и представляют собой хорошие характерные значения плазмы с точки зрения физики.

Отдельно хочется упомянуть графики  $I(U)$  зонда, на которых наблюдается разрыв в районе нуля. Это связано с некоторым холостым током в схеме, который по хорошему должен быть исключен из графика. Тем не менее, на расчет коэффициентов и  $\Delta U$  он повлиять не может.

## **7 Ресурсы**

Расчет по МНК: [метод-наименьших-квадратов.рф](http://метод-наименьших-квадратов.рф)