

Лабораторная работа № 3.5.1  
Изучение плазмы газового разряда в неоне.

Никита Москвитин, Б04-204

2023

# 1 Аннотация

В данной работе был получен ВАХ тлеющего заряда. Так же изучалась плазма и ее свойства.

## 2 Введение

### Плазма

В ионизированном газе поле ионов «экранируется» электронами. Для поля  $\mathbf{E}$  и плотности  $\rho$  электрического заряда

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 4\pi\rho,$$

а с учётом сферической симметрии и  $\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \varphi$ :

$$\frac{d^2\varphi}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d\varphi}{dr} = -4\pi\rho. \quad (1)$$

Плотности заряда электронов и ионов (которые мы считаем бесконечно тяжёлыми и поэтому неподвижными)

$$\begin{aligned} \rho_e &= -ne \cdot \exp\left(\frac{e\varphi}{kT_e}\right), \\ \rho_i &= ne. \end{aligned} \quad (2)$$

Тогда из (1) в предположении  $\frac{e\varphi}{kT_e} \ll 1$  получим

$$\varphi = \frac{Ze}{r} e^{-r/r_D}, \quad (3)$$

где  $r_D = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi ne^2}}$  – *радиус Дебая*. Среднее число ионов в сфере такого радиуса

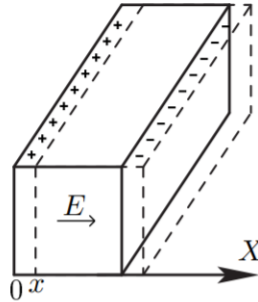


Рис. 1: Плазменные колебания.

$$N_D = n \frac{4}{3} \pi r_D^3. \quad (4)$$

Теперь выделим параллелепипед с плотностью  $n$  электронов, сместим их на  $x$ . Возникнут поверхностные заряды  $\sigma = nex$ , поле от которых будет придавать электронам ускорение:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{eE}{m} = -\frac{4\pi ne^2}{m} x.$$

Отсюда получаем *плазменную (ленгмюровскую) частоту* колебаний электронов:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi ne^2}{m}}. \quad (5)$$

## Одиночный зонд

При внесении в плазму уединённого проводника – *зонда* – с потенциалом, изначально равным потенциалу точки плазмы, в которую его помещают, на него поступают токи электронов и ионов:

$$\begin{aligned} I_{e0} &= \frac{n\langle v_e \rangle}{4} eS, \\ I_{i0} &= \frac{n\langle v_i \rangle}{4} eS, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\langle v_e \rangle$  и  $\langle v_i \rangle$  – средние скорости электронов и ионов,  $S$  – площадь зонда,  $n$  – плотность электронов и ионов. Скорости электронов много больше скорости ионов, поэтому  $I_{i0} \ll I_{e0}$ . Зонд будет заряжаться до некоторого равновесного напряжения  $-U_f$  – *плавающего потенциала*.

В равновесии ионный ток мало меняется, а электронный имеет вид

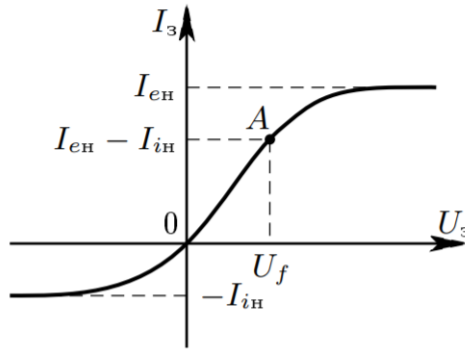


Рис. 2: Реальная зондовая характеристика для одиночного зонда.

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

Будем подавать потенциал  $U_з$  на зонд и снимать значение зондового тока  $I_з$ . Максимальное значение тока  $I_{ен}$  – электронный ток насыщения, а минимальное  $I_{ин}$  – ионный ток насыщения. Значение из эмпирической формулы Бомона:

$$I_{ин} = 0.4neS\sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}}. \quad (7)$$

## Двойной зонд

Двойной зонд – система из двух одинаковых зондов, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга, между которыми создаётся разность потенциалов, меньшая  $U_f$ . Рассчитаем ток между ними вблизи  $I = 0$ . При небольших разностях потенциалов ионные токи на оба зонда близки к току насыщения и компенсируют друг друга, а значит величина результирующего тока полностью связана с разностью электронных токов. Пусть потенциалы на зондах

$$\begin{aligned} U_1 &= -U_f + \Delta U_1, \\ U_2 &= -U_f + \Delta U_2. \end{aligned}$$

Между зондами  $U = U_2 - U_1 = \Delta U_2 - \Delta U_1$ . Через первый электрод

$$I_1 = I_{ин} + I_{e1} = I_{ин} - \frac{1}{4}neS\langle v_e \rangle \exp\left(-\frac{eU_f}{kT_e}\right) \exp\left(\frac{e\Delta U_1}{kT_e}\right) = I_{ин} \left(1 - \exp\left(\frac{e\Delta U_1}{kT_e}\right)\right). \quad (8)$$

Аналогично через второй получим

$$I_2 = I_{\text{ин}} \left( 1 - \exp \left( \frac{e \Delta U_2}{k T_e} \right) \right) \quad (9)$$

Из (7) и (8) с учётом последовательного соединения зондов ( $I_1 = -I_2 = I$ ):

$$\Delta U_1 = \frac{k T_e}{e} \ln \left( 1 - \frac{I}{I_{\text{ин}}} \right)$$

$$\Delta U_2 = \frac{k T_e}{e} \ln \left( 1 + \frac{I}{I_{\text{ин}}} \right)$$

Тогда итоговые формулы для разности потенциалов и тока

$$U = \frac{k T_e}{e} \ln \frac{1 - I/I_{\text{ин}}}{1 + I/I_{\text{ин}}}, I = I_{\text{ин}} \operatorname{th} \frac{e U}{2 k T_e}. \quad (10)$$

Реальная зависимость выглядит несколько иначе и описывается формулой

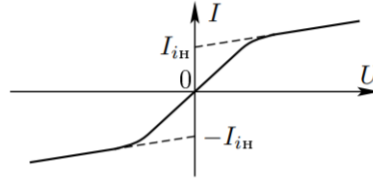


Рис. 3: Реальная зондовая характеристика для двойного зонда.

$$I = I_{\text{ин}} \operatorname{th} \frac{e U}{2 k T_e} + A U. \quad (11)$$

Из этой формулы можно найти формулу для  $T_e$ : для  $U = 0$  мы найдём  $I_{\text{ин}}$ , продифференцируем в точке  $U = 0$  и с учётом  $\operatorname{th} \alpha \approx \alpha$  при малых  $\alpha$  и  $A \rightarrow 0$  получим:

$$k T_e = \frac{1}{2} \frac{e I_{\text{ин}}}{\frac{d I}{d U} \big|_{U=0}}. \quad (12)$$

### 3 Экспериментальная установка

Стеклянная газоразрядная трубка имеет холодный (ненакаливаемый) 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 и II) с помощью переключателя  $\Pi_1$  подключается через балластный резистор  $R_6$  ( $\approx 450$  кОм) к регулируемому 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  $V_1$ , 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 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

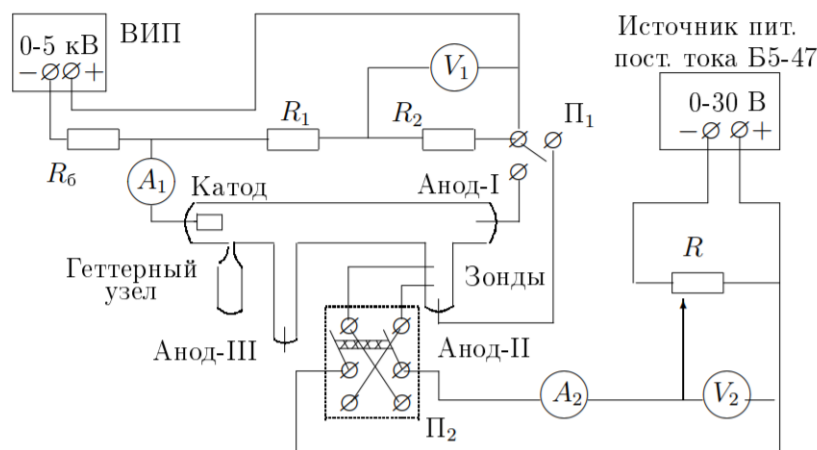


Рис. 4: Экспериментальная установка.

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  $A_2$ .

## 4 Измерения

Измерим ВАХ, а так же зондовые характеристики при 1,5 мА, 3 мА и 5 мА.

## 5 Обработка результатов

Построим графики по зависимостям измеренным в пункте 4. Результаты характеристик приведены в таблице. Также получаем из ВАХа тлеющего разряда, что  $R_{\text{диф}} = (147 \pm 5)$  кОм.

Таблица 1: Итоговые результаты

$I_p$ , мА	$T_e$ , $10^4$ К	$n_e$ , $10^{15}$ м $^{-3}$	$\omega_p$ , $10^4$ рад/с	$r_D$ , $10^{-5}$ см	$N_D$	$\alpha$ , $10^{-7}$
5.0	$41 \pm 4$	$58 \pm 6$	$144 \pm 10$	$49 \pm 3$	30	24
3.0	$42 \pm 4$	$33 \pm 4$	$107 \pm 9$	$66 \pm 5$	40	13
1.5	$41 \pm 6$	$16 \pm 2$	$75 \pm 8$	$94 \pm 10$	57	7

## 6 Вывод

Мы изучили свойства плазмы в разряде, результаты приведены в таблице. Так же исходя из величины максимального сопротивления  $R_{\text{диф}} = (147 \pm 5)$  кОм на ВАХе и его вида, ВАХ мы измерили примерно на поднормальном - переход на нормальный тлеющий разряд.

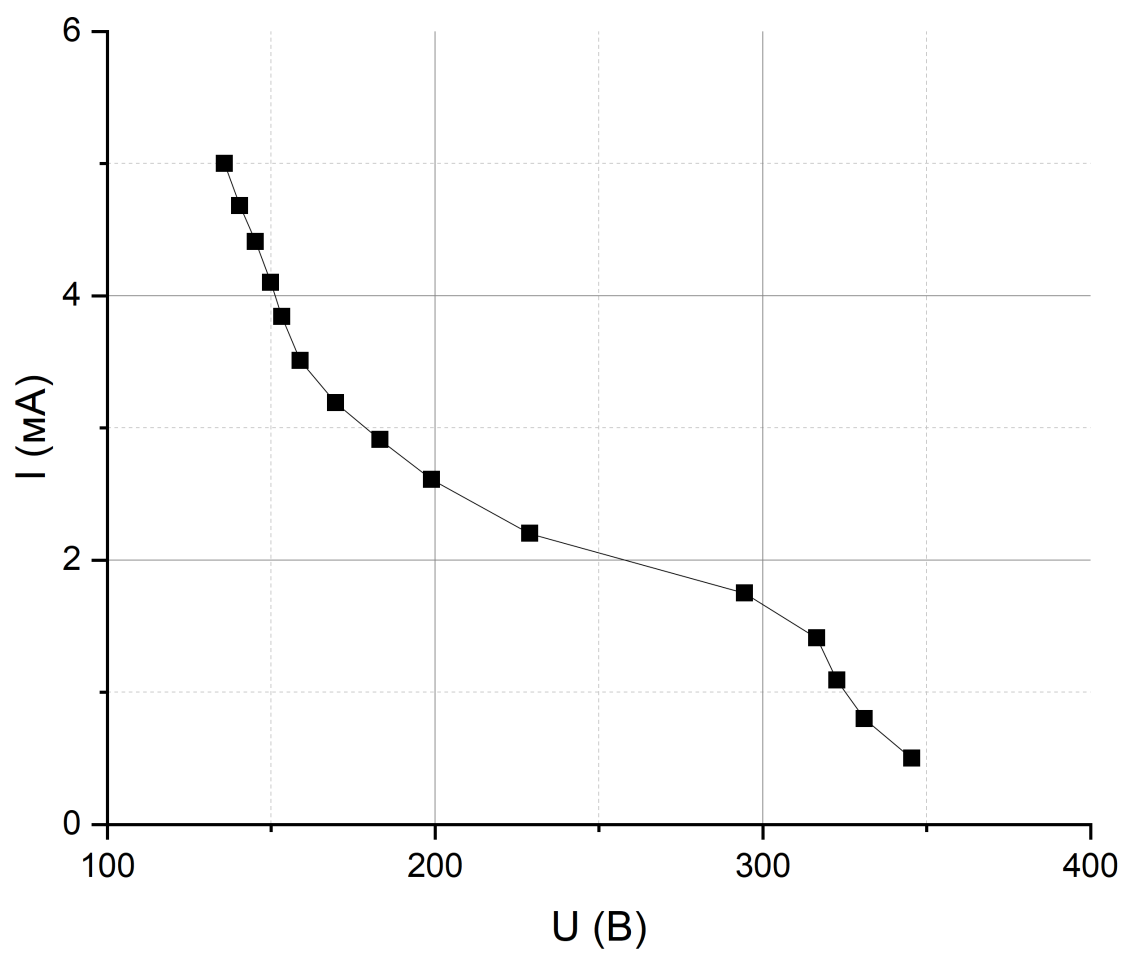


Рис. 5: ВАХ.

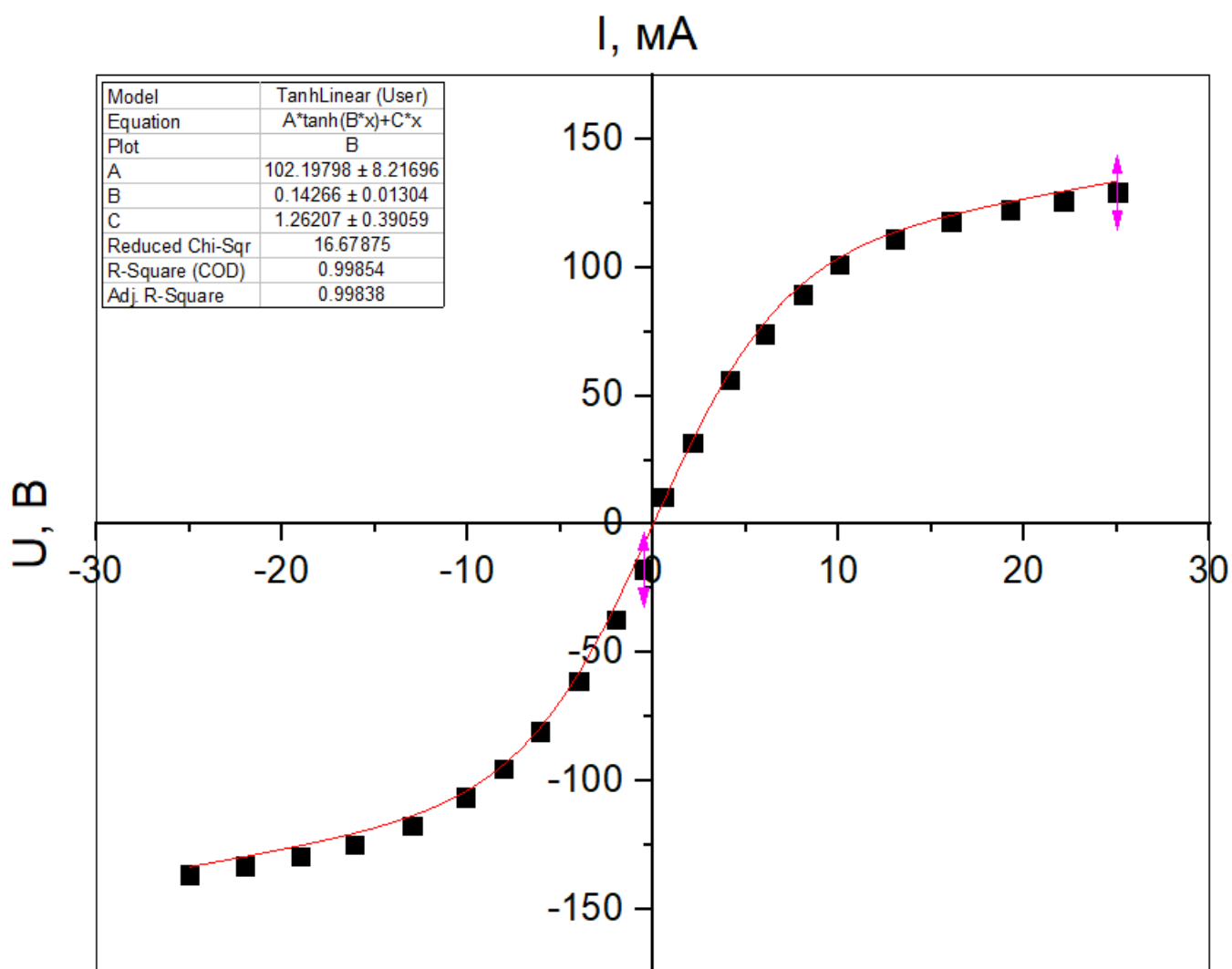


Рис. 6: Зондовая характеристика при  $I = 5$  мА.

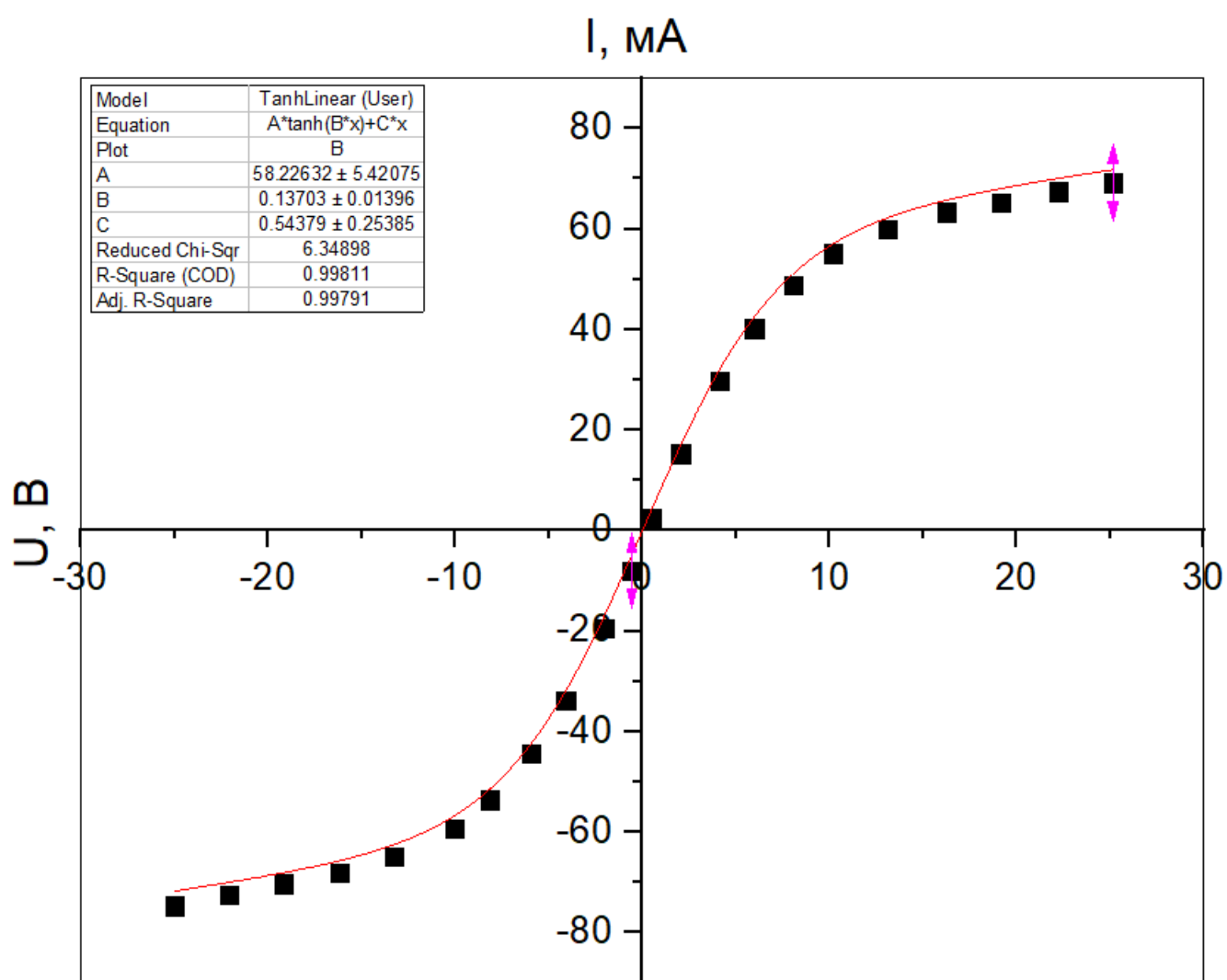


Рис. 7: Зондовая характеристика при  $I = 3 \text{ mA}$ .



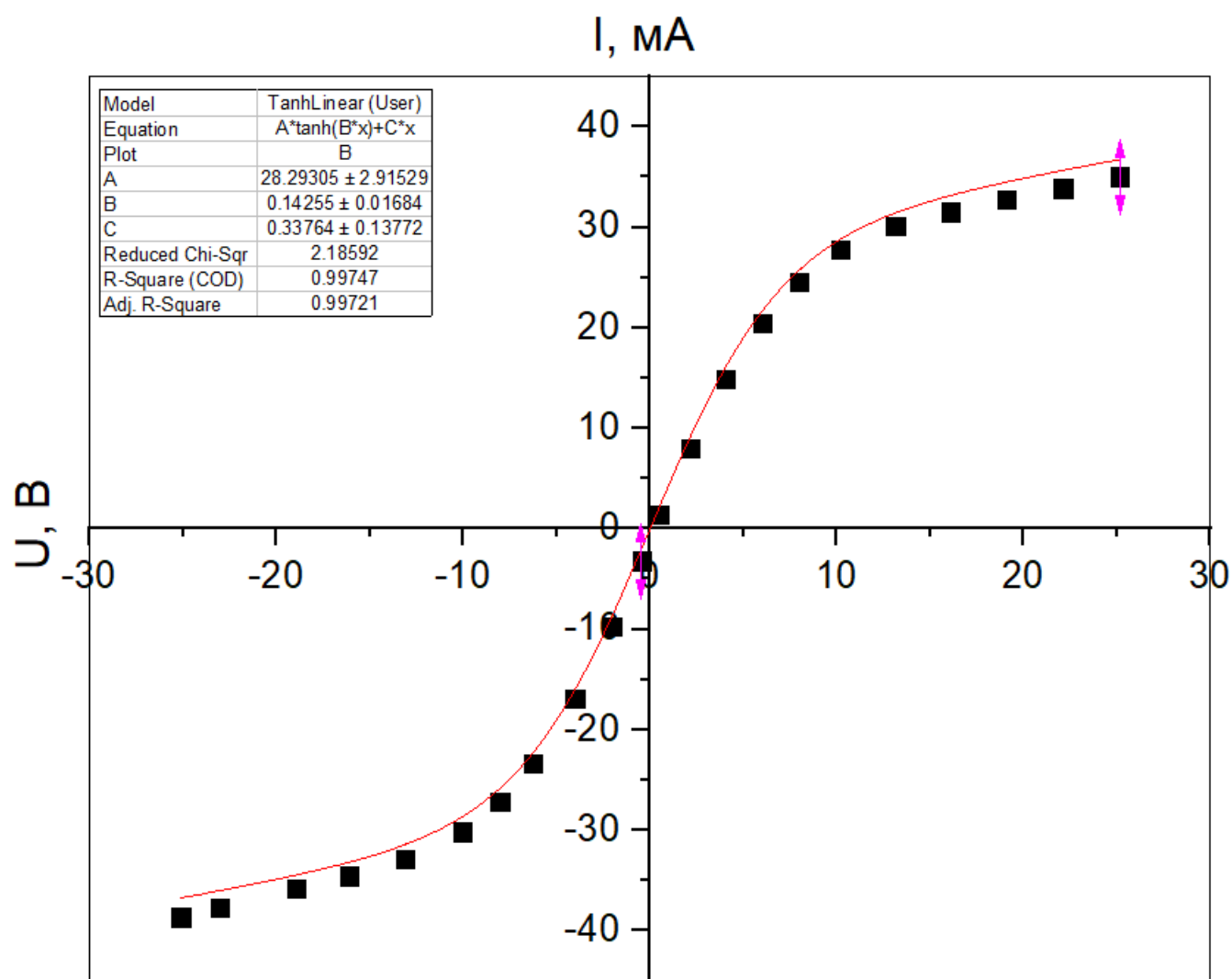


Рис. 8: Зондовая характеристика при  $I = 1,5 \text{ mA}$ .