



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

им. М.В.ЛОМОНОСОВА

**ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

**СПЕЦИАЛЬНЫЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ
ЛАБОРАТОРИИ ГАЗОВЫХ РАЗРЯДОВ**

ДЕИОНИЗАЦИЯ ПЛАЗМЫ

В.А. Черников

Москва - 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	3
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	8
ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ДЕИОНИЗАЦИИ ПЛАЗМЫ	11
УПРАЖНЕНИЯ	15
ЛИТЕРАТУРА	15
РУКОВОДСТВО ПО РАБОТЕ С ПРОГРАММОЙ	16

ВВЕДЕНИЕ

При протекании электрического тока через разрядную трубку, содержащую разреженный газ, в последнем образуется плазма, которая характеризуется определенными значениями концентрации (n_e) и температуры (T_e) электронов, ионов (N_i , T_i) и нейтрального газа (N_g , T_g). В стационарных условиях, когда внешние источники поддержания разряда постоянны, эти величины практически не изменяются. В случае внезапного прекращения разрядного тока стационарные условия нарушаются, и наступает распад плазмы, т. е. процесс ее деионизации, в течение которого электроны и ионы рекомбинируют, образуя нейтральные молекулы, а температура всех компонент плазмы стремится к постоянной величине, равной температуре нейтрального газа. При этом концентрации электронов и ионов уменьшаются, и в конечном итоге, газ переходит в свое нормальное, невозмущенное состояние. Процессы деионизации плазмы играют существенную роль в работе ряда газоразрядных приборов (антенные переключатели, высоковольтные разрядники и т. п.), поэтому механизмы деионизации плазмы при различных условиях являются постоянными объектами изучения.

В настоящей задаче изучается явление деионизации плазмы, образовавшейся при протекании электрического тока через газ при давлениях ниже атмосферного для различных начальных условий (род газа, начальное давление газа, диаметр разрядных трубок).

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.

В общем случае стационарного разряда в газе рождение заряженных частиц n_e , N_i (электронов и ионов) в единице объема плазмы определяется частотой ионизации нейтральных атомов газа, а потери электронов в единице объема связаны с диффузией заряженных частиц и рекомбинацией в объеме. Поэтому уравнение баланса частиц можно записать в следующем виде:

$$v_i \cdot n_e + \nabla(D\nabla n_e) - \alpha_r \cdot n_e^2 - \beta \cdot n_e^3 = 0, \quad (1)$$

где v_i - частота ионизации, D - коэффициент диффузии, α_r - коэффициент объемной рекомбинации с излучением, β - коэффициент объемной рекомбинации при тройных соударениях. При этом считается, что в разряде отсутствуют электроотрицательные атомы. Все входящие в уравнение (1) коэффициенты являются функциями температуры электронов, начального давления газа, а в случае диффузии, и радиуса разрядной трубки.

При выключении разрядного тока происходит уменьшение концентрации электронов в результате диффузии (с последующей рекомбинацией на стенках разрядной трубки) и рекомбинацией в объеме. Скорость спада концентрации электронов определяется следующим выражением (при учете того фактора, что, как показывают оценки, в условиях настоящей работы влиянием объемной рекомбинации при тройных соударениях можно пренебречь):

$$\frac{dn_e}{dt} = v_i \cdot n_e + \nabla(D\nabla n_e) - \alpha_r \cdot n_e^2 . \quad (2)$$

Решение уравнения (2) определяет изменение концентрации электронов во времени $n_e(t)$. Отметим, что после выключения тока величина $v_i \cdot n_e$ при уменьшении v_i и n_e убывает достаточно быстро и в дальнейшем при решении уравнения (2) ее можно полагать равной нулю.

Если длина свободного пробега заряженных частиц, т. е. электронов и ионов, значительно меньше радиуса разрядной трубки R , то движение носителей зарядов к стенке носит характер амбиполярной диффузии. В этом случае, полагая, что коэффициент амбиполярной диффузии D не зависит от координат, запишем уравнение (2) в следующем виде:

$$\frac{dn_e}{dt} = -\frac{n_e}{\tau_d} - \alpha_r \cdot n_e^2 , \quad (3)$$

где τ_d - характерное время диффузии:

$$\tau_d = \frac{\Lambda^2}{D_a} . \quad (4)$$

Λ - так называемая диффузионная длина данного газового объема, а D_a - коэффициент амбиполярной диффузии. В случае, когда плазма занимает объем цилиндрической формы длиной L и радиуса R диффузионная длина, в первом приближении, определяется соотношением:

$$\frac{1}{\Lambda^2} = \left(\frac{2,4}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 . \quad (5)$$

Если $L \gg R$ (случай длинной разрядной трубки), то $\Lambda = R / 2,4$.

Рассмотрим более подробно, чем определяется и как изменяется во времени в процессе деионизации плазмы коэффициент амбиполярной диффузии. В общем случае:

$$D_a = \frac{k \cdot b_i}{e} (T_e + T_i) , \quad (6)$$

где $k = 1,36 \times 10^{-23}$ Дж / К - постоянная Больцмана, а b_i - подвижность ионов, T_e , T_i - температуры электронов и ионов соответственно. Подвижность ионов b_i является функцией давления, так для некоторых газов (в том числе и для гелия) b_i определяется следующим соотношением:

$$b_i \times p = \text{Const} \quad [\text{см}^2 \text{ Тор} / \text{В сек}] . \quad (7)$$

В процессе деионизации плазмы одновременно с уменьшением концентрации электронов происходит и падение их температуры. Так, если в стационарных условиях при протекании электрического тока через газ плазма сугубо неизотермическая ($T_e \gg T_i$), в стадии деионизации плазма остывает и становится изотермической: T_e и T_i приближаются к температуре газа T_g . Отметим, что во всех случаях ионы плазмы быстро передают избыток своей

энергии нейтральным атомам и поэтому за относительно короткое время температура ионов уравнивается с температурой газа, т. е. практически всегда можно полагать, что $T_i = T_g$. Температура электронов после прекращения разрядного тока убывает во времени по следующему закону:

$$\frac{dT_e}{dt} = -\delta \cdot v_{eg} \cdot (T_e - T_g) , \quad (8)$$

где v_{eg} - эффективная частота соударений электронов с нейтральными атомами, δ - средняя доля кинетической энергии электронов, теряемая при одном упругом соударении. В общем случае эффективная частота соударений зависит от температуры электронов, однако для некоторых газов (например, гелий, водород), для которых транспортное сечение соударения электрон - нейтральный атом обратно пропорционально скорости электронов v_{eg} практически не зависит от энергии электронов, и уравнение (8) имеет следующее решение:

$$T_e(t) - T_g = (T_e(0) - T_g) \cdot \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right) , \quad (9)$$

где $T_e(0)$ - температура электронов в стационарной плазме (при протекании электрического тока), $\theta = \frac{1}{\delta \cdot v_{eg}}$ - постоянная времени спада электронной

температуры, при $\delta = 2m_e / M$, $\theta = \frac{M}{2m_e \cdot v_{eg}}$, где m_e и M - массы электрона и молекулы газа соответственно.

Подставляя (9) в (6) и замечая, что $T_e(0) \gg T_g$, а также учитывая выражение (7), для коэффициента диффузии получаем:

$$D_a(t) = \frac{Const}{p} \times \left[2T_g + T(0) \times \exp\left(-\frac{t}{\theta_0}\right) \right] . \quad (10)$$

Выражение (10) определяет постепенное замедление диффузии в процессе деионизации плазмы. В начальные моменты ($t \cong 0$):

$$D_a(0) \cong \frac{Const}{p} T_e(0) \text{ [см}^2\text{/с]} , \quad (11)$$

что соответствует скорости диффузии в стационарной (неизотермической) плазме. С другой стороны после остывания плазмы, в конечной стадии деионизации, при $t \gg 0$.

$$D_a(\infty) \approx 2 \frac{Const}{p} T_g \ll D_a(0) . \quad (12)$$

Рассмотрим процесс деионизации, т. е. механизм убывания концентрации электронов в случае преобладания лишь одного фактора, влияющего на рекомбинацию электронов. Такое рассмотрение возможно, если учесть, что при

низких давлениях ($p < 1 \text{ Тор}$) и небольших концентрациях электронов ($n_e < 10^{12} \text{ см}^{-3}$) деионизация плазмы, в основном, определяется процессами диффузии и рекомбинацией на стенках разрядной трубки. В противоположном случае при высоких давлениях и больших плотностях электронов деионизация происходит в результате объемной рекомбинации. В первом случае простейший закон деионизации, т. е. уменьшение числа электронов во времени, легко определяется из уравнения (3), если положить в нем $v_i \cdot n_e = 0$ и $D_a = \text{Const}$, что, как видно из предыдущего, выполняется либо в начальные моменты деионизации, либо после полного выравнивания температур в плазме:

$$n_e(t) = n_e(0) \cdot \exp(-D_a \times t / \Lambda^2) = n_e(0) \cdot \exp(-t / \tau_0), \quad (13)$$

т. е. концентрация электронов убывает по экспоненте с характерным временем $\tau_0 = \Lambda^2 / D_a$, которое называется постоянной деионизации. Очевидно, что эта постоянная тем больше, чем больше объем, занимаемый плазмой, и чем больше начальное давление газа (при этом, естественно, не учитывается влияние объемной рекомбинации). Кроме того, эта величина зависит от рода газа.

Экспоненциальную зависимость (13) можно представить в виде:

$$\ln\{n_e(t) / n_e(0)\} = -t / \tau_0. \quad (14)$$

Следовательно график зависимости $\ln\{n_e(t) / n_e(0)\}$ от t должен представлять собой прямую линию (см. Рис. 1.). В действительности, как было показано выше, коэффициент амбиполярной диффузии не постоянен в процессе деионизации. В этом случае можно получить более сложный закон изменения плотности электронов во времени:

$$n_e(t) = n_e(0) \times \exp\left\{-\frac{\theta_0}{\tau_0} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\theta_0}\right)\right] - \frac{t}{\tau_\infty}\right\}, \quad (15)$$

где $\tau_0 = \Lambda^2 / D_a(0)$ и $\tau_\infty = \Lambda^2 / D_a(\infty)$ - соответственно начальная и конечная "постоянная времени" деионизации, определяемая начальными и конечными значениями коэффициента диффузии, согласно формулам (11), (12).

Выражение (15) представляет собой не чисто экспоненциальный закон деионизации (Рис. 1), однако в начальные моменты времени при $t \ll \theta$ он может быть представлен приближенной формулой типа (13):

$$n_e(t) \cong n_e(0) \times \exp(-t / \tau_0), \quad (16)$$

так как в этом случае $\tau_\infty \gg \tau_0$ и $1 / \tau_\infty$ можно пренебречь по сравнению с $1 / \tau_0$ (Рис. 1 прямая 1)

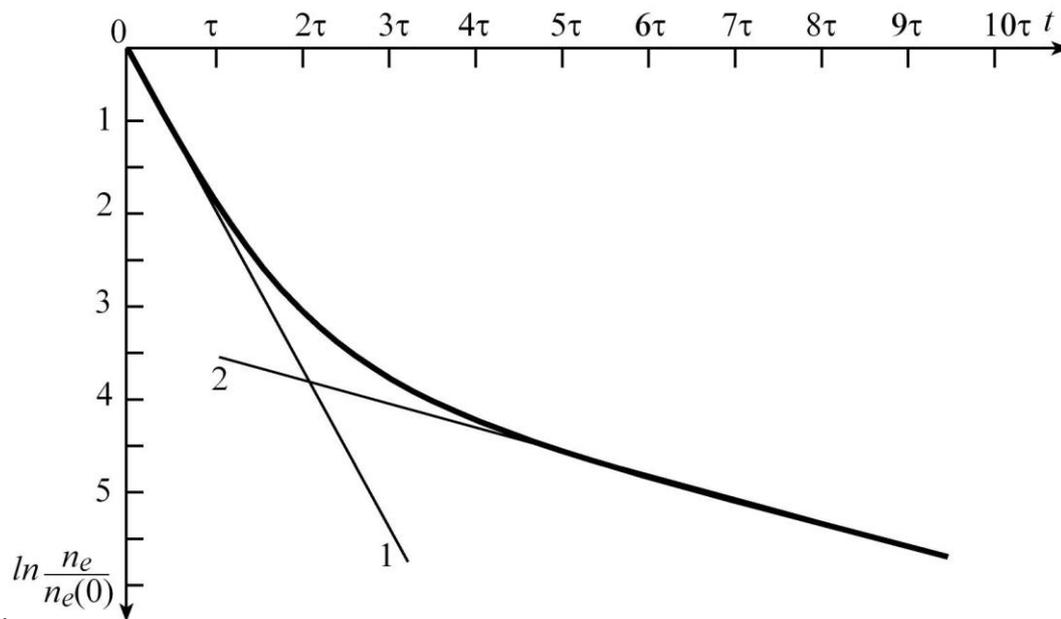


Рис.1

Аналогично, в сравнительно поздние моменты времени (при $t \gg \theta$), когда температуры компонент плазмы уже практически равны между собой, также можно получить более простую приближенную формулу:

$$n_e(t) \approx n_e^* \times \exp(-t / \tau_\infty) , \quad (17)$$

которая также представляет собой экспоненциальный закон, но с гораздо большей постоянной времени деионизации ($\tau_\infty \gg \tau_0$) и с другим значением начальной плотности электронов (Рис. 1 прямая 2):

$$n_e^*(t) = n_e(0) \times \exp(-\theta_0 / \tau_0) . \quad (18)$$

На практике весь ход процесса деионизации в некоторых случаях может быть определен простым экспоненциальным законом типа выражения (13). Действительно, если условия таковы, что $\tau_0 \ll \theta_0$, то плазма распадается (деионизируется) гораздо быстрее, чем остывает (этот случай имеет место при самых низких давлениях), тогда практически во все время процесса $D_a(t) = D_a(0) = \text{Const}$, и уменьшение плотности электронов определяется формулой (16). В противоположном случае, когда выполняется условие $\tau_0 \gg \theta_0$, плазма остывает гораздо быстрее, чем деионизируется (при сравнительно высоких давлениях), вскоре после начала процесса происходит выравнивание температур, $D_a(t)$ быстро падает до постоянного значения $D_a(\infty)$, и концентрация электронов убывает по экспоненциальному закону с постоянной времени τ_∞ (формула 17).

Следует отметить, что вышеприведенные формулы справедливы в том случае, когда выполняются условия диффузионного режима движения заряженных частиц в газе и когда не учитывается процесс рекомбинации в объеме.

В условиях, когда скорость уменьшения числа заряженных частиц определяется процессами объемной рекомбинации, а диффузией частиц к стенкам разрядной трубки можно пренебречь, уравнение (2) запишется в виде

$$\frac{dn_e}{dt} = -\alpha \cdot n_e^2 - \beta \cdot n_e^3, \quad (19)$$

где α - коэффициент объемной рекомбинации с излучением, β - коэффициент объемной рекомбинации при тройных соударениях. Оценки показывают, что в большинстве случаев разрядов при давлениях ниже атмосферного основным процессом объемной рекомбинации будет рекомбинация с излучением, тогда решение уравнения (19) приводит к следующей зависимости плотности электронов от времени:

$$\frac{1}{n_e(t)} - \frac{1}{n_e(0)} = \alpha \cdot t. \quad (20)$$

Следовательно, если излучательная рекомбинация является основным процессом деионизации, то зависимость $n_e(t)$, построенная в координатах $1/n_e(t)$, и t , представляет прямую линию, угол наклона которой определяется коэффициентом излучательной рекомбинации α (см. Рис. 2).

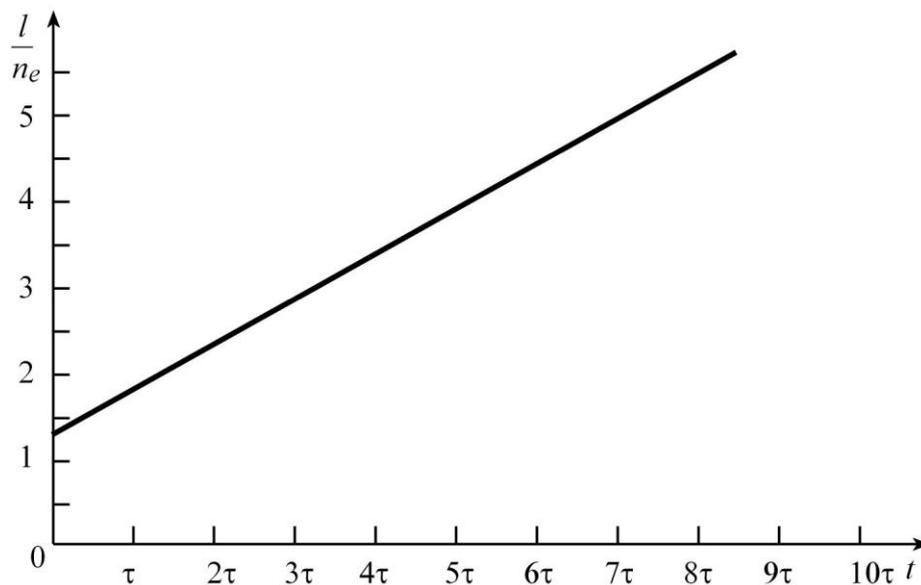


Рис.2

Таким образом, экспериментально изучая изменение концентрации электронов в процессе распада плазмы (после выключения разрядного тока через газ) можно определить основные механизмы деионизации, т. к. зависимости $n_e(t)$ в различных случаях резко отличаются (см. Рис. 1 и Рис. 2)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.

1. Экспериментальная установка. В настоящей работе изучается деионизация плазмы, остающейся в прямой цилиндрической трубке, наполненной разреженным газом, после прохождения в ней разрядного тока.

Принципиальную схему эксперимента можно представить следующим образом (Рис. 3).

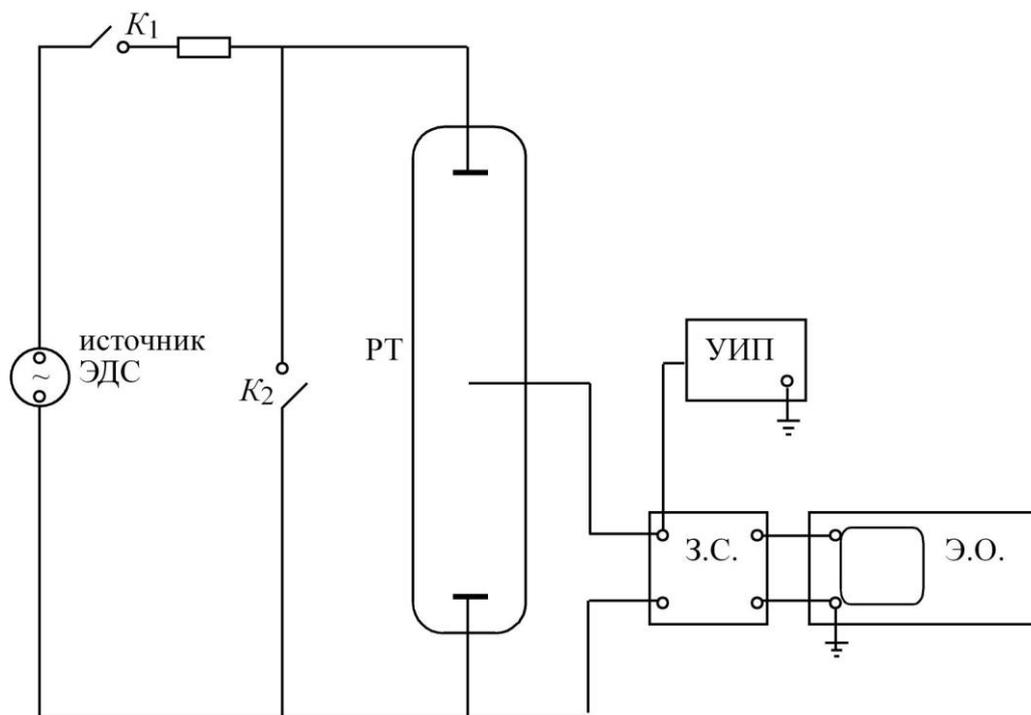


Рис.3

Ток от источника ЭДС при замыкании ключа K_1 пропускается через разрядную трубку РТ (ключ K_2 при этом разомкнут). В трубке возникает плазма, о концентрации зарядов в которой можно судить по току на зонд (З). Величина зондового тока (в относительных единицах) регистрируется при помощи зондовой схемы (З. С.) и электронного осциллографа (Э.О.). При замыкании ключа K_2 разрядная трубка оказывается “ замкнутой накоротко “, и ток от источника пойдет мимо нее через ключ K_2 . С этого момента начинается деионизация плазмы, что приводит к изменению зондового тока, которое регистрируется на экране осциллографа. По тому, как быстро спадает зондовый ток , можно судить о скорости деионизации плазмы. В реальном эксперименте для удобства наблюдения сравнительно быстро протекающего процесса деионизации он повторяется периодически с частотой 50 Гц. Для этого схема питается переменным напряжением (частота 50 Гц), что обеспечивает периодическое возобновление и гашение тока в разрядной трубке (см. Рис. 4).

Обрыв (гашение) тока осуществляется вспомогательным (гасящим) тиристором T_6 (Рис. 4), играющим роль ключа K_2 на схеме Рис. 3. Ток в разрядной трубке нарастает синусоидально, обрыв тока происходит в определенной фазе синусоиды при помощи схемы синхронизации, собранной на транзисторах $T_1 - T_6$, как правило, этот обрыв тока желательно осуществлять в момент максимума разрядного тока, когда он изменяется наиболее медленно.

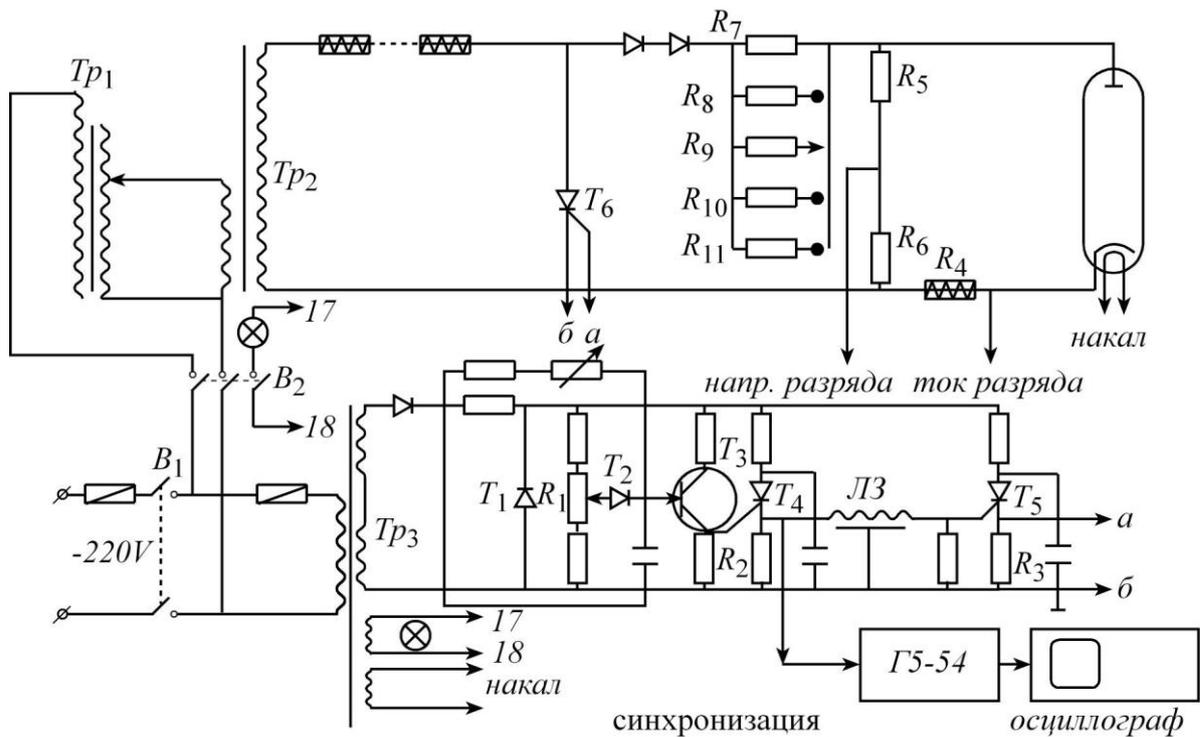


Рис.4

О концентрации зарядов в плазме можно судить по мгновенному значению зондового тока. От дополнительного источника питания на зонд подается отрицательный потенциал ($V \approx 80 \div 100$ В) относительно катода, поэтому на зонд все время идет ионный ток, который можно считать изменяющимся пропорционально концентрации ионов. Наблюдение кратковременного процесса деионизации возможно при использовании осциллографа, работающего в режиме ждущей развертки. Для этой цели в схеме предусмотрена синхронизация запуска осциллографа, опережающая начало процесса деионизации на несколько микросекунд. Схема работает следующим образом. При замыкании выключателя B_1 подается напряжение накала на разрядную трубку, одновременно с понижающей обмотки трансформатора Tr_2 подается напряжение питания на схему синхронизации. В начальный момент тиристоры $T_4 - T_6$ заперты, и ток через них равен нулю.

Запускающий импульс, временное положение которого относительно синусоиды питающего напряжения задается переменным резистором R_1 , через транзистор T_3 отпирает тиристор T_4 . Падение напряжения на резисторе R_2 в цепи тиристора T_4 подается непосредственно на запуск осциллографа, а через линию задержки на запуск тиристора T_5 и затем тиристора T_6 , что приводит к исчезновению тока в разрядной трубке (замыкание ключа K_2 в схеме Рис. 3).

Напряжение питания на разрядную трубку при включении переключателя B_2 подается со вторичной обмотки высоковольтного трансформатора Tr_1 . Ток в цепи разрядной трубки регулируется при помощи сопротивлений $R_7 - R_{11}$.

Для контроля величины разрядного тока в катодную цепь экспериментальной трубки включено сопротивление R_4 (≈ 1 Ом), сигнал с которого подается на второй канал двухлучевого осциллографа. Падение напряжения на разрядной трубке можно контролировать, снимая сигнал с делителя напряжения R_5, R_6 .

2.Методика экспериментальных измерений. В работе экспериментально изучается деионизация плазмы, образовавшейся при протекании разрядного тока через исследуемый газ. Экспериментально разряд создается в прямой цилиндрической стеклянной трубке с накаливаемым катодом. Вдоль оси трубки впаяны измерительные зонды. Трубка, предварительно откаченная и обработанная на вакуумном посту, заполнена гелием при давлении $p = 0,5$ Тора и отпаяна.

При проведении измерений включают тумблер “сеть” на пульте управления схемой питания. Одновременно подается накал на катод экспериментальной трубки. После прогрева катода, включают анодное напряжение (тумблер “анод”) и, изменяя сопротивление R_1 (тумблер “нагрузка”), добиваются стабильного разряда в трубке. Точковый режим разряда можно также регулировать при помощи фазовращателя (потенциометр “фаза”), который определяет момент гашения разряда. Измерительный осциллограф включают на ждущую развертку и подают на него синхронизирующий импульс (выход “синхр.”) и сигнал с зондовой схемы. Затем устанавливают необходимую длительность развертки. Далее, зная масштаб данной развертки осциллографа (например, 5 мкс/дел.), определяют величину ионного тока (амплитуду зондового сигнала) в различные моменты времени. При необходимости в процессе измерений выбирают соответствующую длительность развертки осциллографа. Значения ионного тока достаточно фиксировать в любых единицах, например, в миллиметрах на экране осциллографа. Затем, полагая, что величина ионного тока прямо пропорциональна концентрации ионов, а следовательно, и концентрации электронов, определяют значения отношения $n_e(t) / n_e(0)$ в зависимости от времени, заметим, что в качестве $n_e(0)$ берется максимальное значение зондового сигнала.

Полученные результаты представляют в виде графиков.

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ДЕИОНИЗАЦИИ ПЛАЗМЫ.

1. Основные уравнения. Как уже отмечалось процесс деионизации плазмы в основном определяется изменением во времени двух характерных параметров: концентрации и температуры электронов. Поэтому численный расчет явления деионизации базируется на решении системы дифференциальных уравнений, определяющих изменение во времени этих двух параметров. Такая система имеет следующий вид:

$$\frac{dn_e}{dt} = v_i \cdot n_e - \frac{n_e}{\tau_d} - \alpha \cdot n_e^2 - \beta \cdot n_e^3, \quad (21)$$

$$\frac{dT_e}{dt} = -\delta \cdot v_{eff} \cdot (T_e - T_g) \quad . \quad (22)$$

Для решения данной системы уравнений необходимо задать численные зависимости от температуры электронов и других параметров плазмы всех коэффициентов, входящих в уравнения: v_i , α , β , и др.

Такие зависимости имеют следующий вид.

Частота ионизации:

$$v_i = 4,1 \times 10^6 \times p \times \exp(-eI_i / kT_e) \times (kT_e / e)^{0,5} \times I_i, \quad (1 / \text{сек}) \quad (23)$$

где p - первоначальное давление газа в Торах, I_i - потенциал ионизации газа, для гелия $I_i = 24,5$ В, kT_e / e - выражается в электроновольтах.

Диффузионное время:

$$\frac{1}{\tau_a} = \frac{8 \cdot 10^4 \cdot T_e}{p \cdot R^2} \quad (1 / \text{сек}) \quad , \quad (24)$$

где T_e - выражено в В. При этом учитывалось, что для гелия $b_i \times p = 1,4 \cdot 10^4$, тогда для коэффициента амбиполярной диффузии имеем:

$$D_a = \frac{1,4 \cdot 10^4 \cdot T_e}{p} \quad (\text{см}^2 / \text{сек}) \quad , \quad (25)$$

где давление газа выражено в Торах, а радиус разрядной трубки (R) - в см. Коэффициент излучательной рекомбинации

$$\alpha = 1,6 \times 10^{-7} \quad (\text{см}^3 / \text{сек}) \quad . \quad (26)$$

Коэффициент рекомбинации при тройном соударении:

$$\beta = 8,75 \times 10^{-27} / (T_e)^{9/2} \quad (\text{см}^9 / \text{сек}) \quad , \quad (27)$$

где T_e - выражено в В.

Эффективная частота соударений для гелия выражается следующим соотношением:

$$v_{\text{eff}} = 2 \times 10^9 \times p \quad (1 / \text{сек}) \quad (28)$$

и $\delta = 2m / M = 2,7 \times 10^{-4}$.

С учетом всех приведенных выражений формулы (21) и (22) принимают следующий вид:

$$\frac{dn_e}{dt} = 98 \cdot p \cdot \exp\left(-\frac{24,5}{T_e}\right) \cdot T_e^{0,5} \cdot n_e - \frac{8 \cdot 10^{-2} \cdot T_e}{p \cdot R^2} \cdot n_e - 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot n_e^2 - \frac{8,75 \cdot 10^{-13} \cdot n_e^3}{T_e^{4,5}} \quad (29)$$

$$\frac{dT_e}{dt} = -0,54 \cdot p \cdot (T_e - T_g) \quad , \quad (30)$$

где время задается в микросекундах, а n_e в единицах 10^{10} см^{-3} ,

Как уже отмечалось выше, в уравнении (29) фактором, учитывающим влияние на процесс деионизации рекомбинации при тройном соударении, можно пренебречь, что вполне оправдано при $n_e \leq 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Таким образом,

основными начальными параметрами, определяющими характер деионизации плазмы, будут: начальные значения концентрации и температуры электронов, давление газа в разрядной трубке и ее радиус.

2. Методика численного эксперимента. Численный эксперимент по изучению процесса деионизации плазмы базируется на решении уравнений (29), (30) при соответствующих заданных начальных условиях. Использовалась стандартная программа решения системы дифференциальных уравнений с коэффициентами, зависящими от времени, методом Рунге - Кутты.

В данном эксперименте реализуются две версии программы:

а) Несогласованная программа, в которой концентрация электронов в начальный момент времени является вводным параметром и задается самим пользователем, а температура

определяется из условия теории Шотки. Значения температуры и концентрации электронов для этого случая приведены в Таблице 1 в **“Руководстве по работе с программой”**.

б) Согласованная программа, когда начальная концентрация электронов рассчитывается, исходя из заданной начальной температуры и уравнения (1). Согласно этому уравнению в стационарном режиме (при протекании разрядного тока) производная от концентрации электронов по времени равна нулю. Очевидно, что это условие выполняется и в начальный момент численного счета, т.е. при $t = 0$ расчетной программы (момент, когда ток становится равным нулю), что позволяет записать следующее уравнение для начальной концентрации электронов, используя выражение (29).

$$n_e(0) = \frac{10^3}{1,6} \times \left\{ 98 \cdot p \cdot \exp \left[-\frac{24,5}{T_e(0)} \right] \cdot \sqrt{T_e(0)} - \frac{0,08 \cdot T_e(0)}{p \cdot R^2} \right\} . \quad (31)$$

Таким образом, в этой версии программы в качестве начального плазменного параметра задается лишь начальная температура электронов, а в случае несогласованной версии и начальная концентрация электронов. Более того, в согласованной задаче необходимо, чтобы выражение в фигурных скобках в формуле (31) было положительным, что определяет взаимосвязь между начальной температурой электронов и давлением. Отметим, что равенство нулю выражения в фигурных скобках в (31) соответствует условию теории Шотки для плазмы положительного столба.

Для проведения численного расчета необходимо войти в одну из версий программы. После входа в программу задаются требуемые начальные параметры; начальная температура электронов, давление газа, радиус разрядной трубки и, если необходимо, начальная плотность электронов. Кроме того, задаются начальное и конечное время счета (как правило, $t_0 = 0$), а также шаг расчетной программы. В приложении **“Руководство по работе с программой”** приведены типичные значения вводимых параметров (Таблица 1). При этом

учтена связь между давлением и начальной температурой электронов, согласно которой начальная плотность электронов в выражении (31) должна быть положительной. После ввода начальных значений, компьютер запускается в режим счета. Результаты численного расчета выдаются в виде таблицы, в которой приводятся временные значения температуры и концентрации электронов, $\ln n(t)/n(0)$ и $1/n(t)$, а также в виде графиков $\ln n(t)/n(0)$ и $1/n(t)$ как функции времени. Исходя из полученных графических зависимостей можно, во-первых, качественно определить какой тип рекомбинации преобладает при данном давлении, а затем подтвердить это численными расчетами членов, входящих в уравнение (29) и определяющих диффузионный или излучательный режим рекомбинации, используя при этом табличные данные счета. Во-вторых, графические зависимости позволяют определить характерные времена рекомбинации. Так в случае диффузионного режима, выбирая на графике зависимости $\ln n(t)/n(0)$ от времени линейные участки в начале графика можно по тангенсу угла наклона определить начальное время деионизации (τ_0).

Следует отметить, что данная программа позволяет определять время деионизации двумя методами: в автоматическом режиме, как время уменьшения концентрации электронов в “e” раз, и в управляемом режиме, когда время деионизации определяется из графика зависимости $\ln n(t)/n(0)$ от времени, используя линейные участки на нем.

Более подробно о работе на компьютере изложено в приложении **“Руководство по работе с программой”**, где отражены все характерные моменты расчета, методы вывода данных, способы определения времен деионизации. Там же приведены возможные типичные ошибки в счете, приводящие к сбоям программы.

УПРАЖНЕНИЯ.

1. Провести измерения величин ионного тока на зонд для различных значений разрядного тока, построить графики (в полулогарифмическом масштабе) зависимости от времени величины $\ln n(t)/n(0)$. Значения тока разряда задаются преподавателем.

2. По графикам определить характерные времена деионизации τ_0 и τ_∞ и рассчитать значения коэффициентов диффузии D_0 и D_∞ для данных разрядных токов.

3. Провести численный расчет процесса деионизации в гелии для различных начальных давлений, используя самосогласованную версию программы. Диапазон давлений задается преподавателем. При вводе начальной температуры электронов при различных давлениях пользоваться таблицей 1 из «Руководства по работе с программой».

4. Определить характерные времена деионизации для данных начальных давлений, используя два метода: в автоматическом режиме, как время уменьшения концентрации электронов в “e” раз, и определение время деионизации из графика зависимости $\ln n(t)/n(0)$ от времени, используя линейные участки на нем.

5. На основании полученных результатов построить график зависимости времени деионизации от десятичного логарифма давления, объяснить полученную зависимость

6. Основываясь на результатах численного расчета, используя Таблицу 1 в подпрограмме «Просмотр», записать значения концентрации и температуры электронов для определенного шага счета (например, 5 шага) для трех давлений (например, 0,7, 7 и 70 Тор) и оценить значения факторов, входящих в правую часть уравнения (29) и влияющих на характер процесса деионизации (частоту ионизации, диффузионные и рекомбинационные потери), при различных давлениях.

7. Сравнить результаты численного расчета с экспериментальными данными.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Ч.1.М--Л, 1952,
2. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М., 1992.
3. Браун С. Элементарные процессы в плазме газового разряда. М., 1961.

Руководство по работе с программой

«Численный расчет процесса деионизации плазмы»

Введение.

В данном «Руководстве» содержатся основные методические указания по работе на персональном компьютере при численном расчете явления деионизации плазмы. Данная программа позволяет получить временные зависимости концентрации и температуры электронов в плазме, а также рассчитать в автоматическом или управляемом режиме характерные времена деионизации. Интерфейс программы является стандартным для большинства существующих на сегодняшний день приложений, поэтому работа с программой не вызывает особых затруднений. Тем не менее, в «Руководстве» приведены характерные особенности управления, а также некоторые возможные ошибки и способы их устранения.

Раздел 1. Начало работы и элементы «Главного меню».

Перейдем к непосредственной работе с программой. Исходные файлы находятся в каталоге «**DEIONIZ1**» - согласованная версия и «**DEIONIZ2**» - несогласованная версия. После запуска выбранной версии, появляется заставка с краткой информацией о программе. Для продолжения нужно нажать любую клавишу на клавиатуре либо щелкнуть кнопкой мыши. После этого появляется *Главное меню*, которое состоит из трех подменю: «*Данные*», «*Графики*» и «*Выход*». Отметим, что общее управление программой можно осуществлять параллельно, как с клавиатуры, так и мышью. Выбор необходимого элемента подменю производится наведением указателя (черного прямоугольника) на соответствующий элемент. Перемещение указателя осуществляется стрелками на клавиатуре «←», «→» («**LEFT**», «**RIGHT**») или нажатием левой кнопки мыши, если ее курсор наведен на необходимый элемент подменю. Нажатие кнопки «**ENTER**» или нажатие левой кнопки мыши, когда курсор наведен на черный прямоугольник в меню, раскрывает *Главное меню*, т.е. приводит к появлению операций, содержащихся в данном подменю. Нажатие кнопки «**ESC**» или правой кнопки мыши приводит к обратному действию – закрытию подменю. В дальнейших процедурах нажатие правой кнопки мыши эквивалентно нажатию кнопки «**ESC**» на клавиатуре.

Опишем элементы, содержащиеся во всех подменю.

«*Данные*» - состоит из операций «**Ввод**» и «**Просмотр**».

«*Графики*» - состоит из операций: «**Зависимость $\ln(\text{Net}/\text{Ne}0)$** »

«**Зависимость $(1/\text{Ne})$** » и «**Время деионизации**»

«**Выход**» - осуществляет выход из программы.

Раздел 2. Описание работы с элементами подменю.

«*Ввод*» - осуществляет ввод данных для расчета программой. После

запуска появляется главное окно, на котором отображены параметры, значения которых следует ввести. При этом в окне зафиксированы значения, которые были введены в предыдущий раз. Для ввода новых данных необходимо навести указатель (черный прямоугольник) на параметр, значение которого необходимо изменить, используя клавиши «↑», «↓» («UP», «DOWN») на клавиатуре или курсор мыши. При нажатии клавиши «ENTER» или левой кнопки мыши старое значение параметра стирается. Вводить новое значение можно или с клавиатуры (цифры и десятичная точка), или нажимая кнопки на изображении части клавиатуры на экране. Для этого курсор мыши наводится на соответствующую цифру (см. Рис. 1), и нажатием левой кнопки мыши цифра фиксируется.

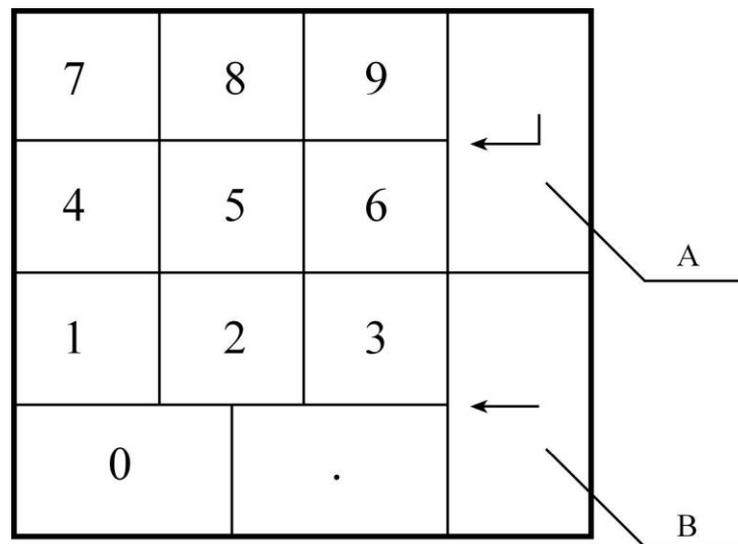


Рис. 1

Всего можно ввести четыре разряда для десятичного числа. При вводе числа «0.123» и «.123» являются эквивалентными. Если не вводить число, а сразу нажать «ENTER», то будет введен «0». Ноль можно вводить только для

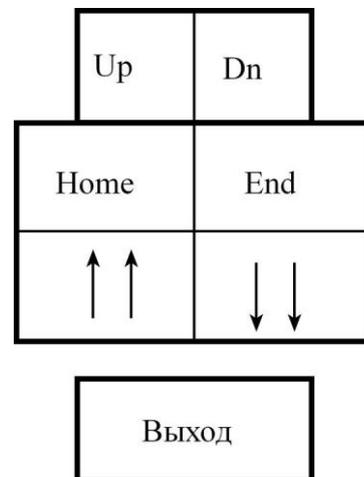
«Начального времени», в противном случае будет выдано сообщение об ошибке. Стирание последнего введенного символа можно осуществить нажатием кнопки «DEL» или наведением курсора мыши на кнопку «B» (см. Рис. 1) и нажатием левой кнопки на ней. Для фиксации введенного значения параметра нажмите клавишу «ENTER» или кнопку «A» (Рис. 1) на экране. Аналогично вводятся значения других параметров. Прервать ввод данных можно нажатием клавиши «ESC» или правой кнопки мыши. Следует обратить внимание на единицы размерности вводимых величин (они указаны в главном окне). После окончания ввода начальных данных переместите указатель в положение «Продолжить» и нажмите «ENTER» или левую кнопку мыши.

«Просмотр» - осуществляет просмотр рассчитанных данных. После запуска появляется подменю, в котором можно выбрать необходимую таблицу. Доступными являются Таблица-1 (зависимость температуры и концентрации электронов, $\ln(N_{el}/N_{e0})$ и $(1/N_e)$ от времени) и Таблица-3

(рассчитанное время уменьшения концентрации электронов в «e» раз). Выбор и запуск таблиц осуществляется так же, как и обычный запуск операций. В нижнем окне экрана отображается краткая справка о содержании таблицы.

Управление **Таблицей-1** осуществляется или с клавиатуры, или с экрана мышью. Опишем действие клавиш (см. Рис. 2).

Медленное перемещение по таблице осуществляется кнопками «**Up**» - вверх и «**Dn**» - вниз. Аналогичное им действие можно осуществить с клавиатуры, нажимая клавиши «**↑**» или «**↓**» («**Up**» «**Down**»). «**Home**» - для перемещения в начало таблицы, «**End**» - конец. Точно такие же клавиши имеются и на клавиатуре. Кнопки «**↑↑**» и «**↓↓**» осуществляют быстрое перемещение по таблице вверх и вниз, соответственно. На клавиатуре соответствуют клавиши; кнопке «**↑↑**» - клавиша «Page Up», а кнопке «**↓↓**» - «Page Down». Для выхода нажмите «**ENTER**» или щелкните левой кнопкой мыши на надписи «Выход». Выйти также можно, нажимая «**ESC**» или правую кнопку мыши.



В **Таблице 3** приводится значение времени деионизации, как промежуток времени, за который концентрация электронов падает в «e» раз. В случае, если вычислить время деионизации при данных параметрах невозможно, появляется сообщение об ошибке. Возможных причин этому две. Первая: время деионизации больше заданного времени счета, тогда следует увеличить конечное время (подменю «**Ввод**»). Вторая: концентрация электронов убывает очень быстро, и рассчитать время деионизации в пределах допустимой ошибки невозможно. В этом случае следует уменьшить шаг счета (то же подменю «**Ввод**»). Оценить какой из этих случаев реализуется можно, используя **Таблицу 1** (т.е. взять начальное и конечное время, определить отношение начальных и конечных концентраций электронов и сравнить с «e»). Если отношение больше «e», то необходимо увеличить время счета, если меньше – то уменьшить шаг счета). Выход из таблицы «**ENTER**» или «**ESC**».

Выход из подменю осуществляется наведением указателя на пункт

«**Отмена**» и нажатием клавиши «**ENTER**» или левой кнопки мыши.

«**Зависимость $\ln(N_{et}/N_{e0})$ »** - графическое представление этой зависимости. По горизонтали отложено время в микросекундах, по вертикали $\ln(N_{et}/N_{e0})$ – безразмерный. Выход или «**ENTER**» или «**ESC**».

«**Зависимость $(1/N_e)$ »** - графическое представление этой зависимости. По горизонтали отложено время в микросекундах, по вертикали - $(1/N_e)$ в $[см^3]$. Выход или «**ENTER**» или «**ESC**».

«**Время деионизации**» - расчет времени деионизации в управляемом

режиме для малых давлений. После запуска появляется графическое представление зависимости $\ln(N_{et}/N_{e0})$ от времени, а также подменю. Для определения времени деионизации необходимо выбрать начальную и конечную точки по времени на участке графика при малых значениях времени, которые для данных параметров можно полагать линейным. Величины начальной точки находятся в окне «А», а значения конечной точки – в окне «В» (см. Рис. 3).

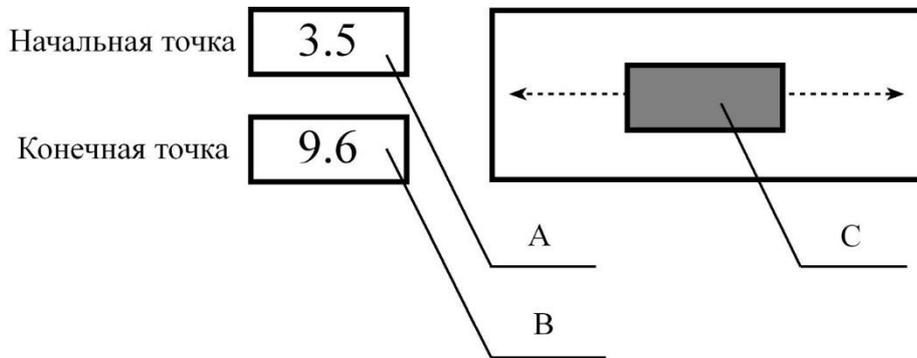


Рис. 3

После входа в это подменю указатель (черный прямоугольник) находится на пункте «Начальная точка». Для изменения значений начального и конечного времени переместите указатель, используя клавиши «↑» или «↓» или («Up» «Down»), в положение «Начальная точка» или «Конечная точка» - соответственно той точке, положение которой необходимо изменить. Затем нажмите «ENTER», тем самым осуществляется режим ввода значения. Стрелками «←» и «→» («LEFT», «RIGHT») переместите точку, выделенную желтым цветом, на координатной плоскости в нужное положение. Далее, используя эти же стрелки, перейдите в положение «С» (см. Рис.3). Для этого, если первоначально точка на координатной плоскости перемещалась влево, следует нажать на клавиатуре стрелку «→», «RIGHT», аналогично, если точка перемещалась вправо, то нажать нужно «←», «LEFT», при этом прямоугольник «С» будет выделен желтым цветом. После этого нажмите «ENTER»- значение соответствующей точки (начальной или конечной) будет введено. Перемещение точки вдоль графика и ввод соответствующего значения можно осуществить так же с помощью мыши. После того, как произошел вход в режим ввода, переместите курсор мыши на графике в положение, где нужно зафиксировать точку, затем нажмите левую кнопку – эта точка на графике займет новое положение, и появится новое значение в окне «А» или «В» - соответственно той точке, положение которой изменялось. Затем наведите курсор мыши на прямоугольник «С» и нажмите левую кнопку мыши – значение будет введено. После задания значений для начальной и конечной точек, переместите черный прямоугольник в положение «Ввести» и нажмите «ENTER». Будет выдано рассчитанное значение времени деионизации в микросекундах. Если значения начальной и конечной точек совпали, то

появится сообщение об ошибке. Для возврата в *Главное меню*, нажмите **«TAB»** или щелкните левой кнопкой мыши на элементе **«Продолжить»** - черный прямоугольник переместится на этот элемент. Далее нажмите **«ENTER»** или еще раз щелкните мышью на нем. Осуществить выход можно так же нажатием **«ESC»** или правой кнопки мыши.

«Выход» - завершение работы программы **«Да»** - закончить, **«Нет»**

-

продолжить работу.