

Взрывная эмиссия

Условие

Задача 1. «Взрывная эмиссия»

В данной задаче Вам предстоит исследовать явления, происходящие при эмиссии (по-русски «испускании») электронов поверхностью металла (в данном случае платины). Вам понадобятся некоторые характеристики платины, представленные в таблице.

Характеристики платины.

Обозначение	Pt
Молярная масса μ , г/моль	195
Плотность ρ , кг/м ³	21450
Удельная теплоемкость c , Дж/(кг К)	134
Теплопроводность κ , Вт/(м К)	71,6
Температура плавления, К	2045
Удельное электрическое сопротивление γ , Ом м	$1,1 \cdot 10^{-7}$

1. Концентрация электронов. Основными носителями заряда в металлах являются электроны. Оцените концентрацию электронов проводимости в платине, считая, что от каждого атома в зону проводимости перешел один электрон.

Число Авогадро $N_A = 6,023 \text{ моль}^{-1}$.

2. Электрическое поле

Для того чтобы электрон смог покинуть металл, необходимо ему «помочь», создав, например, электрическое поле у поверхности и/или повысив температуру металла. В частности, это может быть электрическое поле, создаваемое самим металлом, если у него есть какой-то электрический потенциал.

Рассмотрим установку, работу которой Вам предстоит исследовать. Она представляет собой металлический анод и платиновый образец-катод, находящиеся в глубоком вакууме. Анод заземлен. Потенциал катода отрицательный и равен $-\varphi$.

Будем считать, что электроны, вылетевшие с поверхности металла, сразу же уносятся электрическим полем к аноду и никакого влияния на происходящие в установке процессы не оказывают.



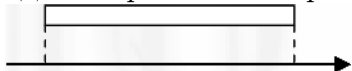
На поверхности платинового катода, как бы хорошо она ни была отшлифована, всегда имеются шероховатости, неровности, микровыступы. В случае необходимости, микроострия могут быть созданы специально. Рассмотрим одно такое острие. Оно представляет собой тонкую цилиндрическую иглочку длиной $l = 500 \text{ мкм}$ и радиусом $r = 10 \text{ мкм}$, заканчивающуюся полусферическим острием такого же радиуса $r = 10 \text{ мкм}$. К катоду приложен потенциал $-\varphi$. Покажите, что модуль напряженности вблизи острия равен $E \approx \frac{\varphi}{r}$, где r — радиус кривизны острия.

3. Теплопроводность.

Если тело нагрето неравномерно, то возникает перенос тепла из более горячих частей в более холодные, при этом поток теплоты (то есть теплота, переносимая через единич-

ную площадь за единицу времени $q = \frac{\Delta Q}{\Delta S \Delta t}$) определяется законом Фурье $q = -\kappa \frac{\Delta T}{\Delta x}$, где ΔT - разность температур в близких точках, расстояние между которыми Δx , а коэффициент κ - так называемая теплопроводность вещества. Знак минус подчеркивает, что тепло переносится от частей с большей температурой к частям с меньшей температурой. Рассмотрим однородный стержень длиной l , площадью поперечного сечения S и теплопроводностью κ .

3.1. Боковая поверхность стержня теплоизолирована. На первом торце ($x = 0$) температура поддерживается равной T_0 , на втором ($x = l$) T_1 . Найдите распределение температуры $T(x)$ вдоль стержня. Изобразите примерный график распределения температуры.



3.2. Весь стержень теплоизолирован, кроме торца $x = 0$, на котором поддерживается температура T_0 . Найдите распределение температуры вдоль стержня. Изобразите примерный график этой зависимости. **3.3.** Пусть в единице объема стержня в единицу времени выделяется теплота w (ещё её можно назвать плотностью мощности тепловыделения). Весь стержень теплоизолирован, кроме торца $x = 0$, который поддерживается при постоянной температуре T_0 . Покажите, что распределение температуры вдоль стержня $T(x) = T_0 + \frac{w}{\kappa}x(l - \frac{x}{2})$. Чему равна температура торца ($x = l$) T_l ? **3.4.** Стержень сделан из металла с удельным сопротивлением γ и по нему течет ток плотностью j . Весь стержень теплоизолирован, кроме торца $x = 0$, который поддерживается при постоянной температуре T_0 . Найдите температуру торца ($x = l$) T_l .

4. Эмиссия электронов.

Вернемся к платиновому образцу. Если потенциал металла отрицательный, то вблизи поверхности металла создается электрическое поле, которое помогает электронам покинуть металл. Плотность тока с поверхности металла зависит от напряженности электрического поля E и температуры T , причем зависимость эта достаточно сложная, но в интересующем нас диапазоне напряженностей и температур её можно аппроксимировать следующим образом

$$j(T) = \begin{cases} a, & T < b \\ a + k(T - b), & T \geq b \end{cases}$$

причем сами коэффициенты a, b, k зависят от напряженности электрического поля

$$a = a_1 \exp(a_2 E)$$

$$b = b_1 - b_2 E$$

$$k = k_1 \exp(k_2 E)$$

$a_1 = 2,60 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2$	$b_1 = 1983 \text{ К}$	$k_1 = 319 \text{ А/м}^2\text{К}$
$a_2 = 1,01 \cdot 10^{-9} \text{ м/В}$	$b_2 = 1,67 \cdot 10^{-8} \text{ К} \cdot \text{м/В}$	$k_2 = 9,39 \cdot 10^{-10} \text{ м/В}$

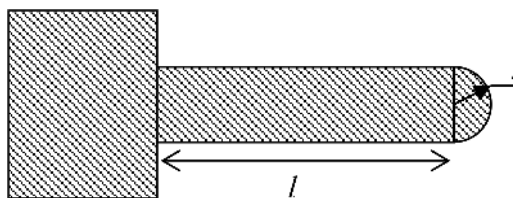
4.1. Изобразите примерный график зависимости плотности тока от температуры $j(T)$ при отсутствии электрического поля. Как изменится этот график, при наличии электрического поля?

4.2. К катоду приложили отрицательный потенциал по абсолютной величине равный 50 кВ. Определите установившуюся температуру T_l острия платиновой иглолочки. Основание иглолочки поддерживается при температуре $T_0 = 300 \text{ К}$, вся остальная иглолочка теплоизолирована

(потерями на излучение можно пренебречь). Считайте, что эмиссия электронов происходит только с полусферического острия иголки.

4.3. Если температура острия достигает температуры плавления, то происходит его разрушение – быстрое испарение в вакуум. Определите критический потенциал $\varphi_{кр}$, т.е. максимальный потенциал, который можно приложить к катоду, чтобы ещё не произошло разрушение острия иголочки.

4.4. К катоду приложили отрицательный потенциал, по величине равный $\varphi = 130$ кВ. Чему равна плотность тока сразу после включения? Найдите время после включения, через которое произойдет взрыв иголочки.



Решение

Задача 1. «Взрывная эмиссия»

1. Концентрация электронов.

Один моль платины имеет массу μ и занимает объем $V = \mu/\rho$, при этом в нем находится N_A атомов. Если от каждого атома в зону проводимости перешел один электрон, то в одном моле платины будет N_A электронов, а их концентрация будет равна

$$n = \frac{N_A}{V_m} = \frac{N_A \rho}{\mu} \quad (1)$$

$$n = 6,62 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3} \quad (2)$$

При такой большой концентрации электроны не покидают металл, потому что на них действуют силы

Для того чтобы электрон покинул металл, надо сообщить ему дополнительную энергию, например, повысив температуру металла. Эмиссию электронов под действием электрического поля позволяет объяснить только квантовая механика.

2. Электрическое поле.

Точное нахождение электрического поля вблизи поверхности металла при известном потенциале — достаточно сложная задача, но приближенно можно показать связь напряженности и потенциала на примере металлической сферы. Если на сфере радиусом r находится заряд Q , то напряженность электрического поля у поверхности

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2},$$

а потенциал

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Как видно,

$$E = \frac{\varphi}{r}. \quad (3)$$

Вблизи острия металлической иглолки данное равенство выполняется только приближенно, но можно использовать его для оценки напряженности электрического поля.

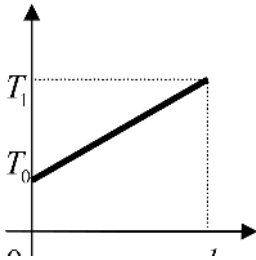
3. Теплопроводность.

3.1. Так как стержень однородный и нет источников теплоты внутри стержня, то поток теплоты в любом сечении постоянен.

$$q = -\kappa \frac{dT}{dx} = \text{const}$$

$$\left| \frac{dT}{dx} = C \right|$$

$$\int_{T_0}^T dT = C \int_0^x dx \quad (4)$$



$$T(x) = T_0 + Cx,$$

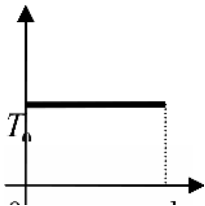
причем на торце $x = l$ $T(l) = T_1$, поэтому $C = \frac{T_1 - T_0}{l}$

$$T(x) = T_0 + \frac{x}{l}(T_1 - T_0) \quad (5)$$

График этой зависимости – прямая линия.

3.2. Если стержень теплоизолирован и на одном из концов поддерживается постоянная температура T_0 , то никакого потока тепла в этом стержне нет и температура по всей длине стержня постоянна и равна

$$T(x) = T_0. \quad (6)$$



3.3. Поскольку стержень теплоизолирован, то в установившемся режиме (то есть, когда температура перестанет изменяться) для теплового баланса необходимо, чтобы вся теплота, выделяющаяся правее некоторой точки x стержня (то есть, с части стержня длиной $l - x$), отводилась путем теплопередачи.

Уравнение теплового баланса

$$\boxed{P_{\text{тепл}} + qS = 0} \quad (7)$$

$$(l - x)Sw - \kappa \frac{dT}{dx} S = 0$$

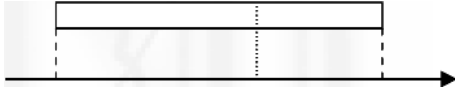
$$\frac{dT}{dx} = (l - x) \frac{w}{\kappa}$$

$$\int_{T_0}^T dT = \int_0^x \frac{w}{\kappa} (l - x) dx$$

$$\boxed{T(x) = T_0 + \frac{w}{\kappa} lx - \frac{w}{\kappa} \frac{x^2}{2} = T_0 + \frac{w}{\kappa} x \left(l - \frac{x}{2} \right)} \quad (8)$$

Температура правого торца стержня равна

$$\boxed{T_l = T_0 + \frac{wl^2}{2\kappa}} \quad (9)$$



3.4. Если по стержню течет ток плотностью j , то по закону Джоуля-Ленца в дифференциальной форме в единице объема в единицу времени выделяется теплота

$$\boxed{w = \gamma j^2}. \quad (10)$$

Соответственно, температура правого торца стержня будет равна

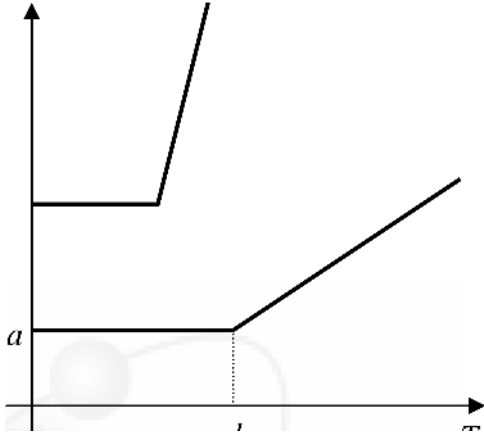
$$\boxed{T_l = T_0 + \frac{\gamma j^2 l^2}{2\kappa}} \quad (11)$$

4. Эмиссия электронов.

4.1. Зависимость $j(T) = \begin{cases} a, & T < b \\ a + k(T - b), & T \geq b \end{cases}$ кусочно-линейная, причем коэффициент a

показывает, насколько график приподнят над осью абсцисс, коэффициент b показывает температуру излома, а коэффициент k - угловой коэффициент для наклонного участка графика. С ростом напряженности электрического поля вблизи поверхности металла коэффициент a увеличивается, коэффициент b уменьшается, а коэффициент k увеличивается.

График зависимости $j(T)$ при двух значениях напряженности показан на рисунке.



4.2. Если потенциал катода равен $\varphi = -50 \cdot 10^3$ В, то напряженность поля вблизи острия иглолки равна $E = 5 \cdot 10^9$ В/м. Значения коэффициентов равны $a = 4,06 \cdot 10^7$ А/м², $b = 1900$ К, $k = 3,49 \cdot 10^4$ А/(м²К).

Тепло, выделяющееся в иглолке при протекании по ней тока, вызывает нагрев. В установившемся режиме

При протекании тока плотностью j температура острия будет равна $T = T_0 + \frac{\gamma j^2 l^2}{2\kappa}$ (см. п. 3.4).

Можем выразить плотность тока в зависимости от температуры острия

$$j = \sqrt{\frac{2\kappa}{\gamma l^2}(T - T_0)}$$

Смысл этого соотношения: чтобы температура острия была равна T , по иглолке должен течь ток плотностью j .

Поскольку эмиссия происходит с поверхности полусферы площадью $2\pi r^2$, а поперечное сечение иглолки равно πr^2 , при этом сила тока одинакова что внутри иглолки, что с поверхности острия, то плотность тока внутри иглолки и на поверхности острия отличаются в два раза:

$$\pi r^2 j_{\text{внутри}} = 2\pi r^2 j_{\text{поверхн}}$$

$$j_{\text{внутри}} = 2j_{\text{поверхн}}. \quad (12)$$

Соответственно, для того, чтобы температура острия была равна T , с поверхности должен стекать такой ток, что

$$2j_{\text{поверхн}} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\gamma l^2}(T - T_0)}$$

$$j_{\text{поверхн}} = \sqrt{\frac{\kappa}{2\gamma l^2}(T - T_0)}$$

Для удобства дальнейшей работы обозначим коэффициент

$$\chi = \sqrt{\frac{\kappa}{2\gamma l^2}} = 3,61 \cdot 10^7 \text{ А/(м}^2\text{К}^{1/2}\text{)}$$

Плотность тока эмиссии j_1 определяется температурой острия T

$$j_1(T) = \begin{cases} a, & T < b \\ a + k(T - b), & T \geq b \end{cases}$$

А плотность тока j_2 , который должен стекать с острия, чтобы на нем была температура T , определяемая теплопередачей

$$j_2(T) = \chi \sqrt{T - T_0}$$

Очевидно, что это одна и та же плотность тока, поэтому температура стационарного состояния определяется уравнением

$$\boxed{j_1(T) = j_2(T)} \quad (13)$$

Построим обе функции на графике, точки пересечения будут соответствовать решениям. Решения два. Рассмотрим первое, которое соответствует меньшей температуре. Если вдруг случайно температура увеличится, то плотность тока эмиссии не изменится, а вот потери теплоты возрастут (для поддержания температуры требуется большая плотность тока), и острие иглой начнет охлаждаться. Если вдруг температура острия уменьшится, то потери теплоты тоже уменьшатся, но ток эмиссии будет тем же, поэтому игла начнет нагреваться. Это решение устойчиво, потому что отклонения температуры от стационарной приводят к процессам, возвращающим иглу к равновесной температуре.

Решение же, соответствующее большей температуре, неустойчиво. Стоит только температуре случайно увеличиться, как ток эмиссии станет больше, а увеличение потерь теплоты не сможет компенсировать увеличение выделяющегося джоулева тепла. Это приведет ещё большему разогреву иглолочки – температура уходит от равновесного значения.

На практике, если не создать специальных условий, при небольших плотностях тока реализуется только устойчивое решение, ведь нагрев иглой от комнатной температуры производится при помощи протекающего тока.

Найдем это значение температуры T_l . Условие (13) превращается в

$$a = \chi \sqrt{T_l - T_0}$$

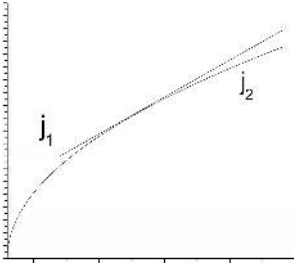
$$\boxed{T_l = T_0 + \frac{a^2}{\chi^2}} \quad (14)$$

$$\boxed{T_l = 301,3\text{K}} \quad (15)$$

***Примечание.

Не обязательно строить именно графики*** $j_1(T)$ и $j_2(T)$, *можно построить их квадраты, но рассуждения при этом будут аналогичными, и численные ответы получатся такими же.*

4.3. Значения коэффициентов a, b, k зависят от напряженности электрического поля, соответственно, от потенциала катода. При некотором значении потенциала возникнет критическая ситуация, когда потери тепла на теплопроводность не смогут остановить разогрев, температура достигнет температуры плавления и наступит разрушение острия иглой. Это может наступить, если устойчивое решение уравнения (13) станет равным температуре плавления (случай А) или если $j_1(T) \geq j_2(T)$ для любой температуры T , что соответствует касанию графиков в одной точке, что может произойти двумя способами (случай Б и В).



Выясним, какой случай реализуется в нашей задаче. Реализоваться может только один из трех возможных случаев, поскольку функции $a(E)$, $b(E)$, $k(E)$ монотонные, причем $a(E)$, $k(E)$ экспоненциально быстро возрастают.

График $j_1(T)$ - это «уголок». Выясним, какие положения на графике может занимать вершина угла. При напряженности электрического поля E положение вершины угла на графике - это точка $(b(E), a(E))$.

Система

$$a = a_1 \exp(a_2 E)$$

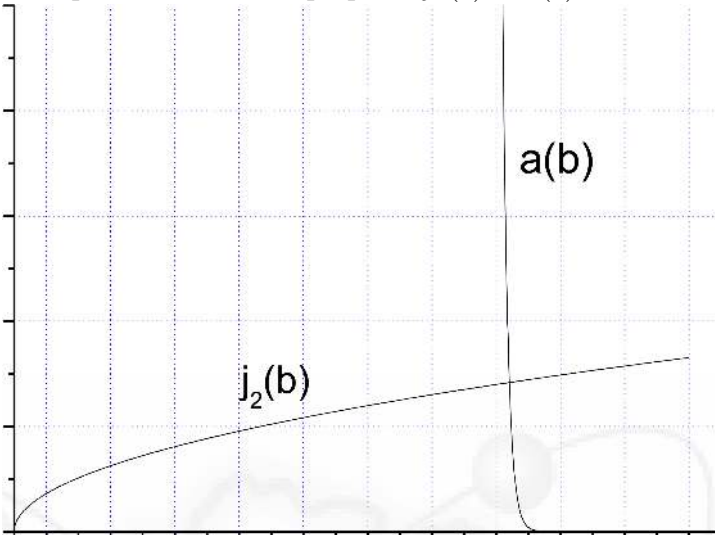
$$b = b_1 - b_2 E$$

задает положение вершины «уголка» в параметрическом виде. Можно построить по точкам график возможных положений вершины угла, задавая разные значения напряженности электрического поля. Можно заметить, что коэффициент b , у которого размерность температуры, линейно связана с E , поэтому

$$E = \frac{b_1 - b}{b_2}$$

$$a = a_1 \exp\left(\frac{a_2}{b_2}(b_1 - b)\right)$$

Построим на одном графике $j_2(b)$ и $a(b)$.



По графику сразу видно, что случай в этой задаче не реализуется, поскольку вершина уголка пересекает график $j_2(b)$ при температуре, меньшей температуры плавления платины $T_{пл} = 2045\text{K}$.

Скорее всего, мы имеем дело со случаем Б, но это надо доказать. Для того чтобы действительно реализовался случай А, необходимо, чтобы вершина уголка совпадала с одной из точек $j_2(T)$, то есть

$$b = T^*$$

$$a = \chi \sqrt{T^* - T_0}$$

и график $j_1(T)$ шел круче, чем $j_2(T)$, то есть

$$k > \left. \frac{dj_2}{dT} \right|_{T=T^*} = \frac{\chi}{2\sqrt{T^* - T_0}} \quad (16)$$

Температуру, соответствующую решению T^* , можно найти графически, если аккуратно построить график, а можно найти аналитически, ведь

$$a = a_1 \exp \left(\frac{a_2}{b_2} (b_1 - b) \right).$$

Тогда

$$\chi \sqrt{T^* - T_0} = a_1 \exp \left(\frac{a_2}{b_2} (b_1 - T^*) \right)$$

$$T^* = T_0 + \frac{a_1^2}{\chi^2} \exp \left(\frac{2a_2}{b_2} (b_1 - T^*) \right).$$

Это уравнение аналитически не решается, но можно воспользоваться методом последовательных приближений. При этом необходимо соблюдать осторожность, поскольку использование метода по формуле $T^{*(k+1)} = T_0 + \frac{a_1^2}{\chi^2} \exp \left(\frac{2a_2}{b_2} (b_1 - T^{*(k)}) \right)$ не дает решение, потому что метод расходится. Необходимо сделать небольшие математические преобразования и применять метод по формуле $T^{*(k+1)} = \left(b_1 - \frac{b_2}{2a_2} \ln \left(\frac{\chi^2}{a_1^2} (T^{*(k)} - T_0) \right) \right)$.

Метод очень быстро сходится и даже если взять начальное приближение $T^{*(0)} = 1800\text{K}$, уже после первой итерации получается правильный ответ

$$T^* = 1840,8\text{K} \quad (17)$$

Эта температура соответствует напряженности электрического поля

$$E^* = \frac{b_1 - T^*}{b_2} = 8,5 \cdot 10^9 \text{ В/м}$$

при этом величина критического потенциала равна (с точностью до знака)

$$\varphi_{\text{кр}} = 85 \text{ кВ} \quad (18)$$

Но ещё необходимо проверить условие (). При напряженности поля $E^* = 8,5 \cdot 10^9 \text{ В/м}$, коэффициент $k = 9,33 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2 \text{ К}$, а $\frac{\chi}{2\sqrt{T^* - T_0}} = 4,60 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2 \text{ К}$. Поскольку

$$k > \left. \frac{dj_2}{dT} \right|_{T=T^*} = \frac{\chi}{2\sqrt{T^* - T_0}}, \quad (19)$$

то действительно реализуется случай Б.

4.4. При подаче на катод потенциала $\varphi = 130$ кВ напряженность электрического поля вблизи острия принимает значение $E = 1,3 \cdot 10^{10}$ В/м. Значения коэффициентов при данной напряженности равны $a = 1,31 \cdot 10^{11}$ А/м², $b = 1721$ К, $k = 6,39 \cdot 10^7$ А/м² К.

Плотность тока сразу после включения, пока иглоочка не успела разогреться до температуры b , равняется

$$j_1 = a = 1,31 \cdot 10^{11} \text{ А/м}^2. \quad (20)$$

Но даже при температуре плавления платины плотность тока

$$j_2 = 1,51 \cdot 10^9 \text{ А/м}^2, \quad (21)$$

что на два порядка меньше начальной плотности тока j_1 . Это означает, что потерями теплоты на теплопроводность можно пренебречь и считать иглоочку полностью теплоизолированной. Выделяющаяся джоулева теплота идет только на нагревание иглоочки. В таком случае уравнение теплового баланса

$$cm\Delta T = P_{\text{дж}}\Delta t$$

$$c\rho V\Delta T = \gamma j^2 V\Delta t$$

В дифференциальном виде

$$dt = \frac{c\rho}{\gamma j^2(T)} dT \quad (22)$$

$$t = \frac{c\rho}{\gamma} \int_{T_0}^{T_{n\pi}} \frac{dT}{j^2(T)}$$

Поскольку $j(T)$ — кусочно-линейная функция, то интеграл надо считать отдельно до точки b и после неё.

$$t_1 = \frac{c\rho}{\gamma} \int_{T_0}^b \frac{dT}{a^2} = \frac{c\rho}{\gamma a^2} (b - T_0)$$

$$t_2 = \frac{c\rho}{\gamma} \int_b^{T_{n\pi}} \frac{dT}{[a + k(T - b)]^2} = \frac{c\rho}{\gamma k} \int_b^{T_{n\pi}} \frac{d[a + k(T - b)]}{[a + k(T - b)]^2} = -\frac{c\rho}{\gamma k} \frac{1}{[a + k(T - b)]} \Big|_b^{T_{n\pi}} = \frac{c\rho}{\gamma k} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{[a + k(T_{n\pi} - b)]} \right)$$

Время до взрыва равно

$$t = \frac{c\rho}{\gamma a^2} (b - T_0) + \frac{c\rho}{\gamma k} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{[a + k(T_{n\pi} - b)]} \right) \quad (23)$$

$$t = 2,6 \cdot 10^{-6} \text{ с} = 2,6 \text{ мкс} \quad (24)$$

В течение времени до взрыва с острия иглоочки идет достаточно большой ток. Явление взрывной эмиссии используют в генераторах очень мощных и очень коротких импульсов тока.

