

# Электростатика



**Кузнецов Сергей Иванович**  
доцент кафедры ОФ ЕНМФ ТПУ

# Тема 6. ЭМИССИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ ПРОВОДНИКОВ.

## КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ НА ГРАНИЦАХ ПРОВОДНИКОВ

### 6.1. Эмиссия электронов из проводников

#### 6.1.1. Термоэлектронная эмиссия

#### 6.1.2. Холодная и взрывная эмиссия

#### 6.1.3. Фотоэлектронная эмиссия

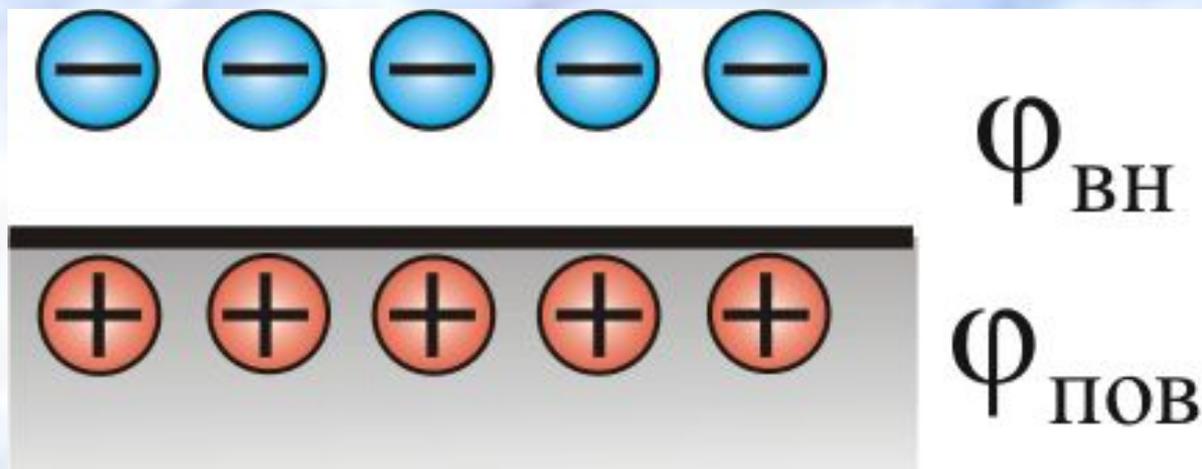
### 6.2. Контактные явления на границе 6.2.

#### Контактные явления на границе\_6.2.

#### Контактные явления на границе

## 6.1. Эмиссия электронов из проводников

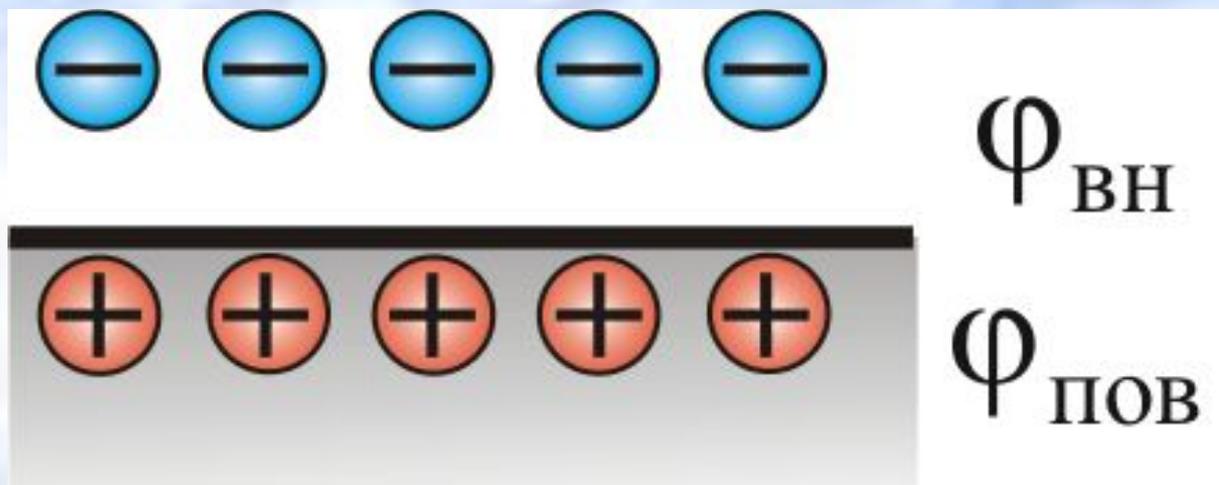
- Электрон свободен только в границах металла. Как только он пытается перейти границу «металл – вакуум», возникает кулоновская сила притяжения между электроном и образовавшимся на поверхности избыточным положительным зарядом



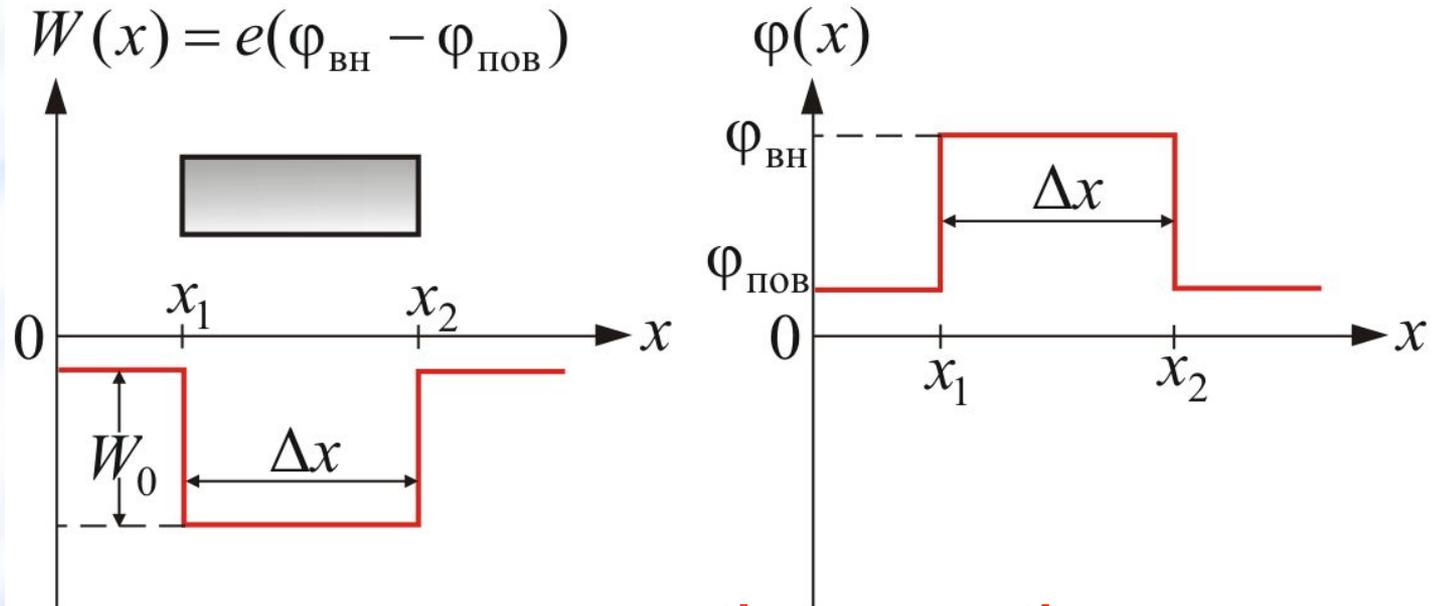
Вблизи от поверхности образуется электронное облако, и на границе раздела формируется двойной электрический слой с

***разностью потенциалов***

$$\varphi_{\text{вн.}} - \varphi_{\text{пов.}}$$



- **Скачки потенциала** на границе металла показаны на рисунке

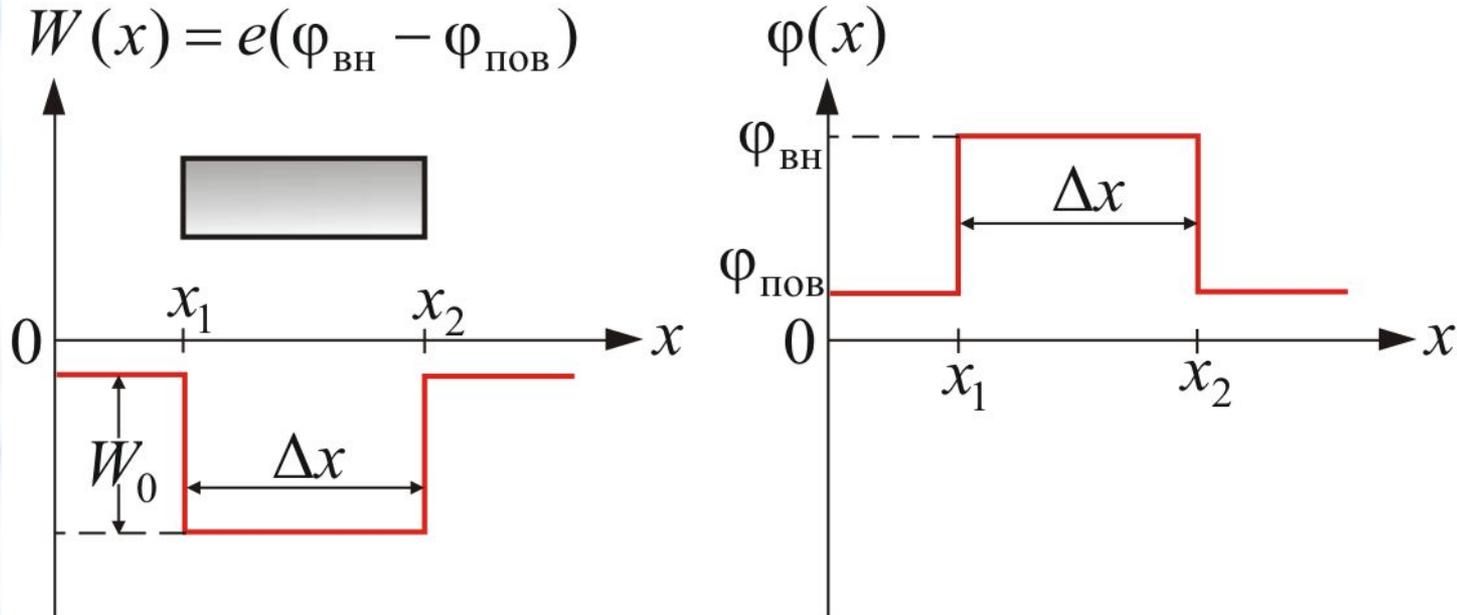


- **В занятом металлом объеме образуется потенциальная энергетическая яма**
- Так как в пределах металла электроны свободны, и их энергия взаимодействия с узлами решетки равна нулю.
- За пределами металла электрон приобретает энергию  $W_0$ . Это энергия притяжения, поэтому  $W_0 < 0$ .

- Для того, чтобы покинуть металл, электрон должен преодолеть потенциальный барьер и совершить работу

$$A_{\text{ВЫХ}} = e(\varphi_{\text{ВН}} - \varphi_{\text{ПОВ}}).$$

(6 1 1)

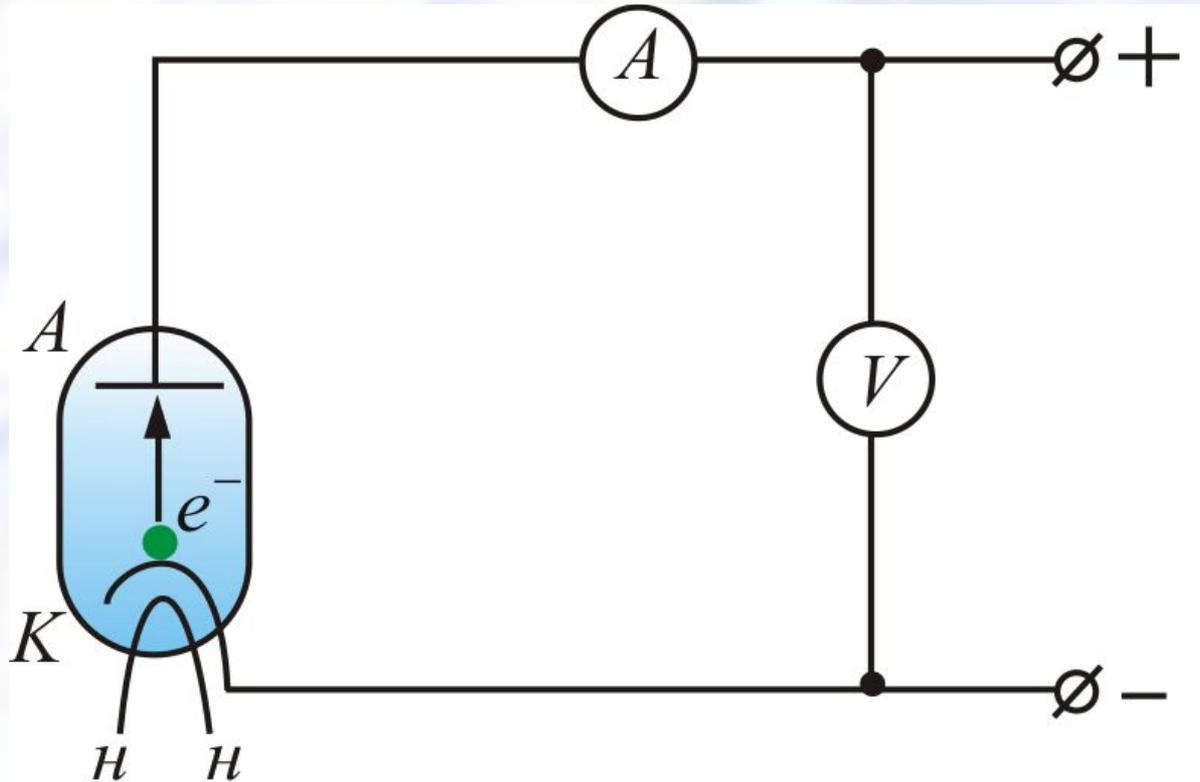


- Эту работу называют **работой выхода электрона из металла**.  $A_{\text{ВЫХ}} = e(\varphi_{\text{ВН}} - \varphi_{\text{ПОВ}})$ .
- Для ее совершения электрону необходимо сообщить достаточную энергию  $W \geq A_{\text{ВЫХ}}$ .

## 6.1.1. Термоэлектронная ЭМИССИЯ

- Величина работы выхода зависит от химической природы вещества, от его термодинамического состояния и от состояния поверхности раздела.
- ***Если энергия, достаточная для совершения работы выхода, сообщается электронам путем нагревания, то процесс выхода электронов из металла называют термоэлектронной эмиссией.***

- Явление испускания электронов нагретыми телами (эмиттерами) в вакуум называется **термоэлектронной эмиссией**.



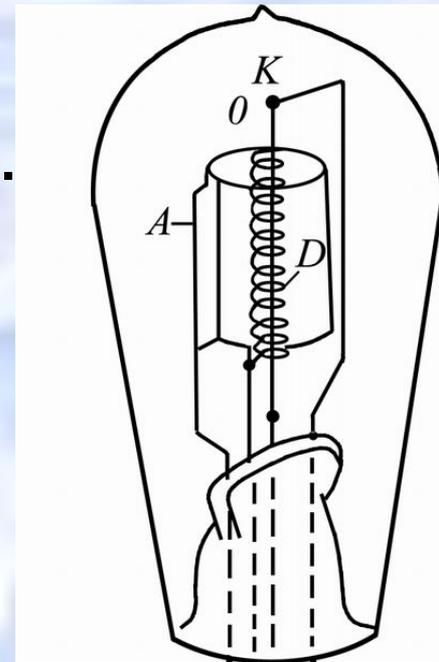
- Нагрев необходим для того, чтобы энергии теплового движения электрона было достаточно для преодоления сил кулоновского притяжения между отрицательно заряженным электроном и индуцируемым им на поверхности металла положительным зарядом при удалении с поверхности. Кроме того, при достаточно высокой температуре над поверхностью металла создается отрицательно заряженное электронное облако, препятствующее выходу электрона с поверхности металла в вакуум.

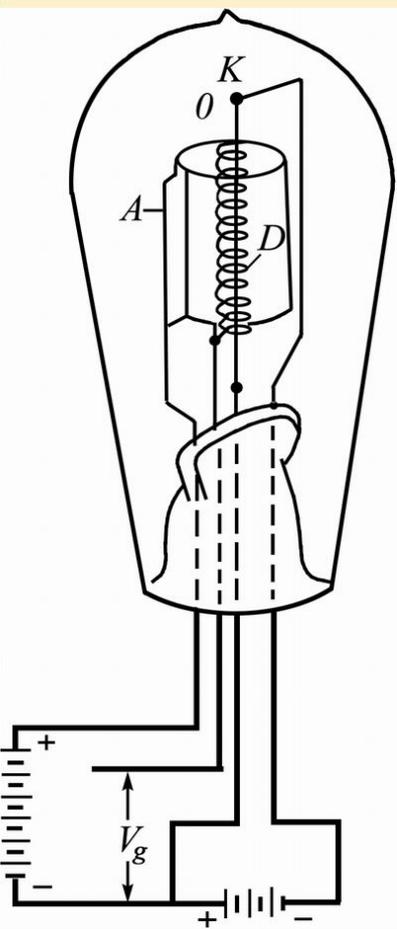
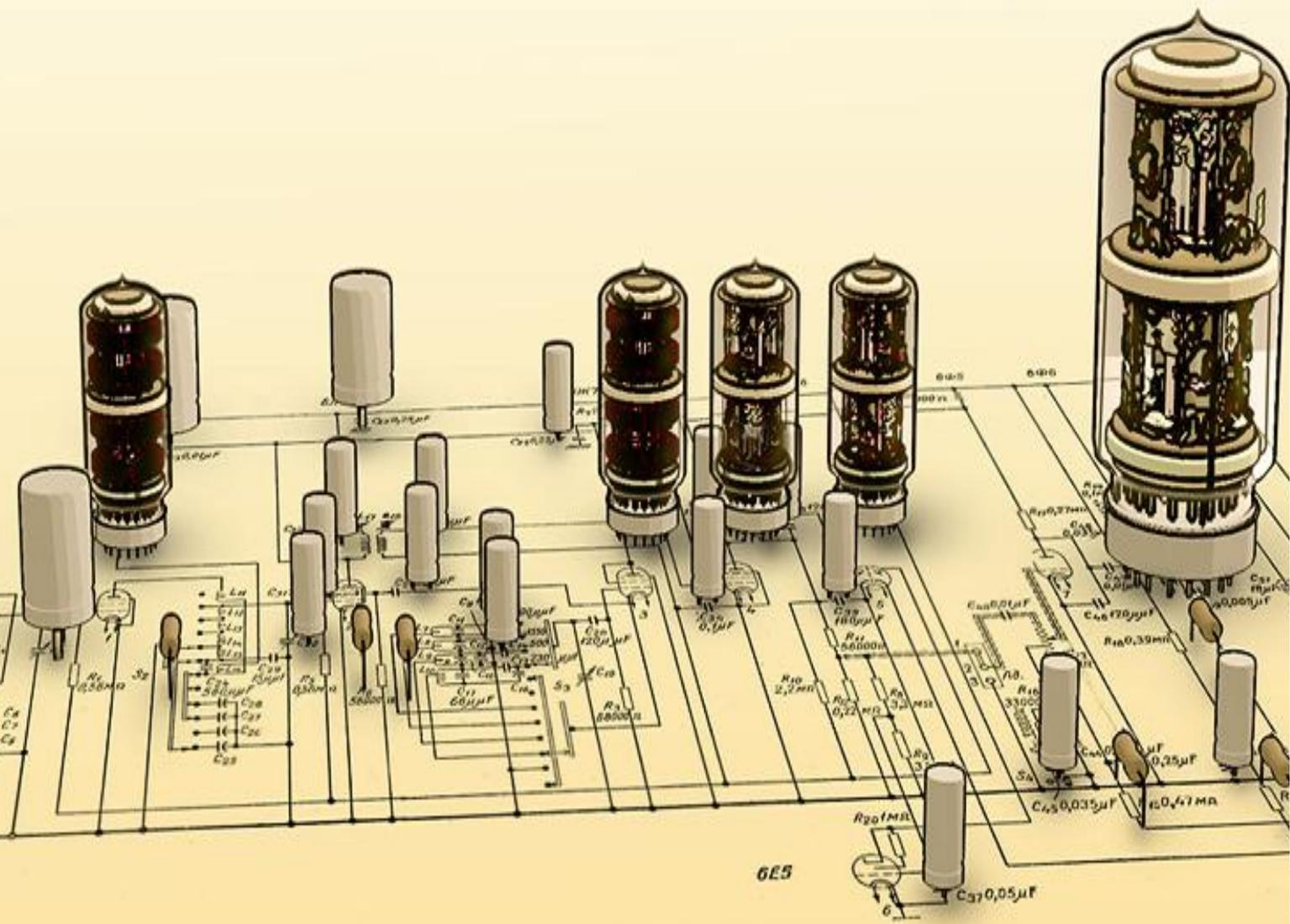
- **Явление термоэлектронной эмиссии открыто в 1883 г.** знаменитым американским изобретателем **Эдисоном.**

- Это явление наблюдалось им в вакуумной лампе с двумя электродами – анодом, имеющим положительный потенциал, и катодом с отрицательным потенциалом.

- Катодом лампы может служить нить из тугоплавкого металла (вольфрам, молибден, тантал и др.), нагреваемая электрическим током.

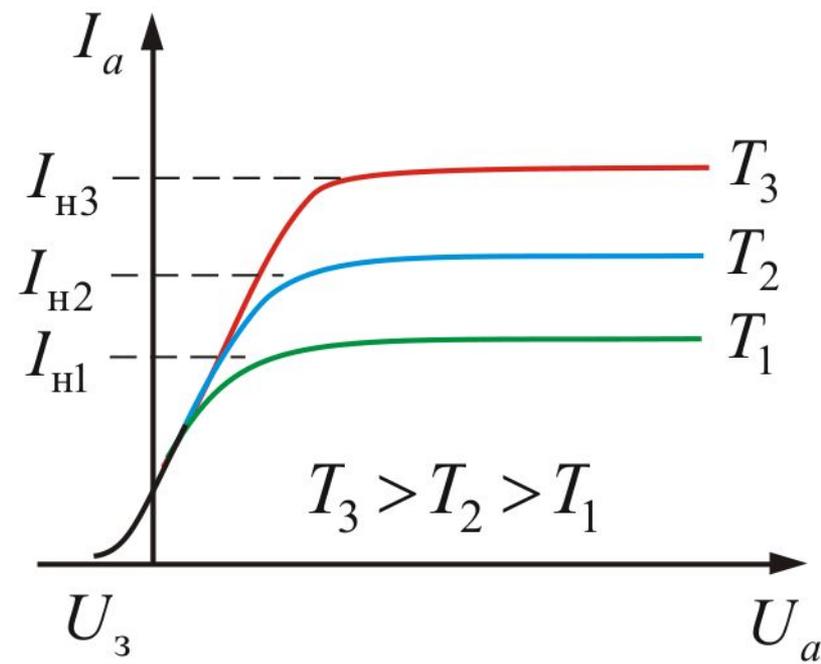
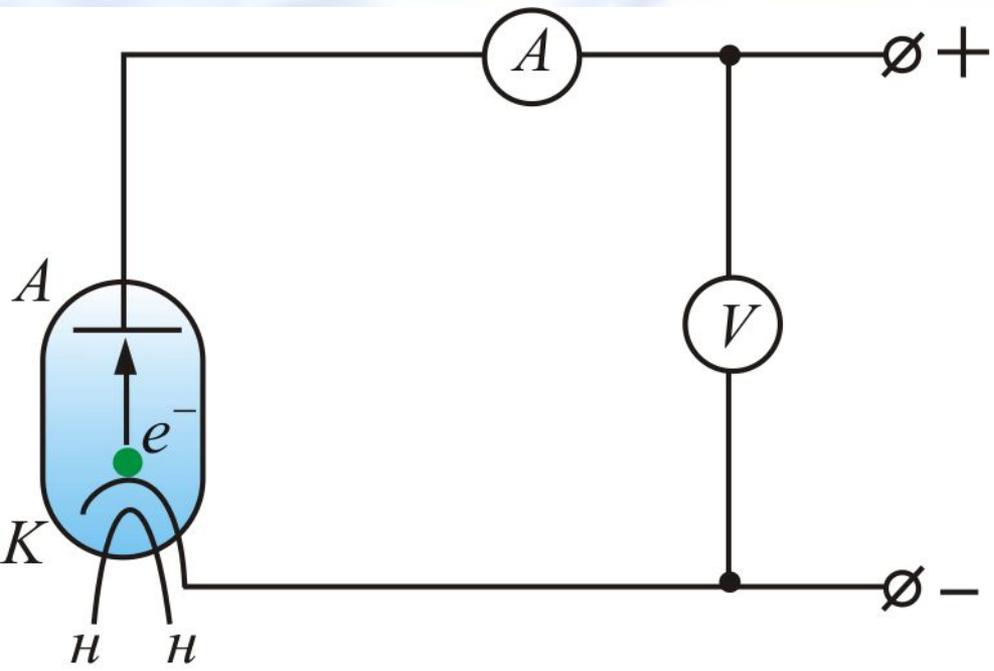
- Такая лампа называется **вакуумным диодом.**





- Если катод холодный, то ток в цепи катод – анод практически отсутствует.
- При повышении температуры катода в цепи катод – анод появляется электрический ток, который тем больше, чем выше температура катода.
- При постоянной температуре катода ток в цепи катод – анод возрастает с повышением разности потенциалов  $U$  между катодом и анодом и выходит к некоторому стационарному значению, называемому **током насыщения**  $I_n$ .
- При этом **все термоэлектроны, испускаемые катодом, достигают анода.**
- Величина тока анода не пропорциональна  $U$ , и поэтому для вакуумного диода закон Ома не выполняется.

- На рисунке показаны **схема вакуумного диода и вольт-амперные характеристики (ВАХ)  $I_a(U_a)$**
- **$U_3$  – задерживающее напряжение** при котором  **$I = 0$**

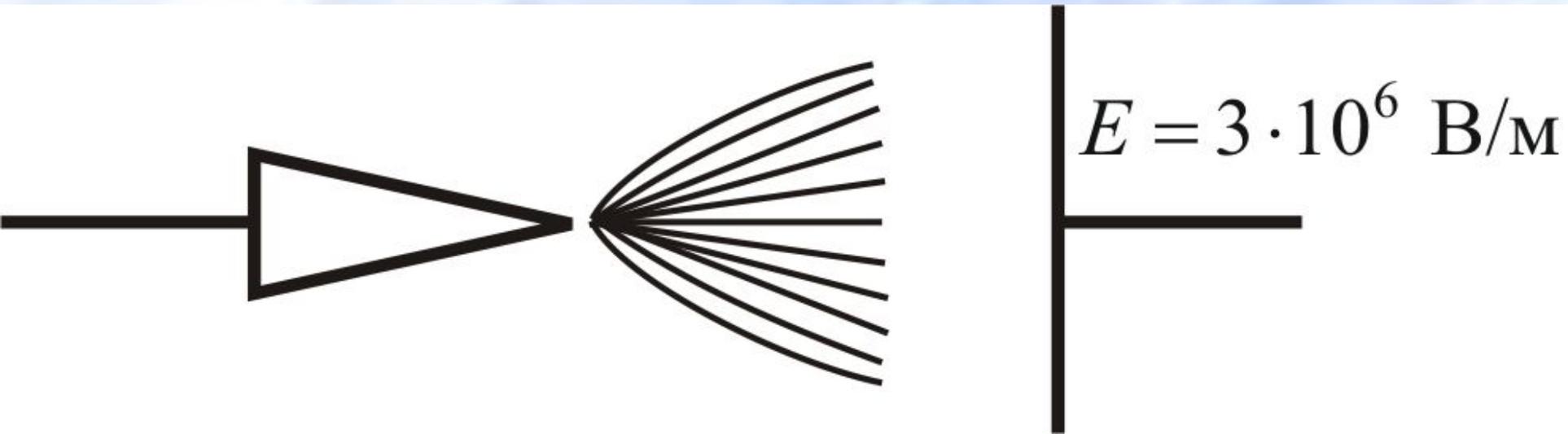


- **$I_H$  – ток насыщения**, при котором **все** электроны, испускаемые катодом достигают анода

## 6.1.2. Холодная и взрывная эмиссия

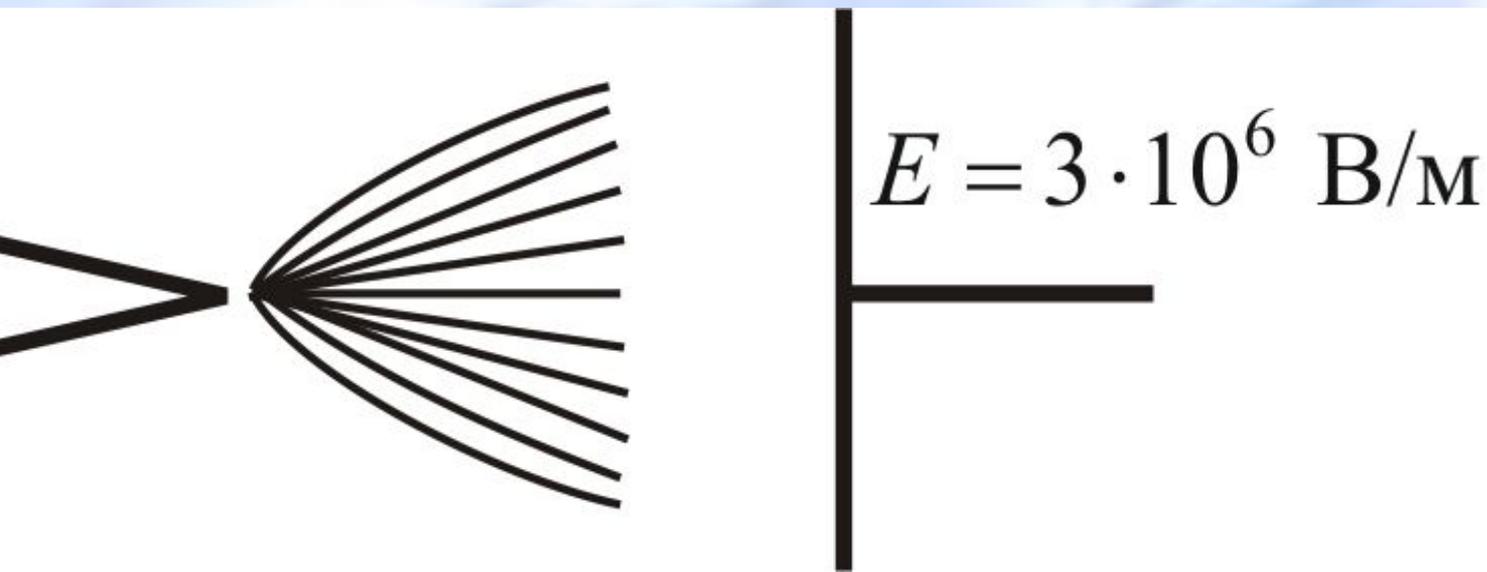
- *Электронную эмиссию, вызываемую действием сил электрического поля на свободные электроны в металле, называют **холодной** или **автоэлектронной эмиссией**.*
- Для этого должна быть достаточной **напряженность** поля и должно выполняться **условие**
- $$A_{\text{ВЫХ}} = e(\varphi_{\text{ВН}} - \varphi_{\text{ПОВ}}) \leq eEd,$$
- здесь  $d$  – толщина двойного электрического слоя на границе раздела сред.

- Автоэлектронную эмиссию можно наблюдать в **хорошо откачанной вакуумной трубке**, катодом которой служит **острие**, а анодом – обычный электрод с плоской или мало изогнутой поверхностью.



- Напряженность электрического поля на поверхности острия с радиусом кривизны  $r$  и потенциалом  $U$  относительно анода равна

$$E = \frac{U}{r}.$$



- При  $r \sim 10^{-2}$  мм и  $U \sim 10^3$  В  $E \sim 10^6$  В/см, что приводит к появлению слабого тока, обусловленного автоэлектронной эмиссией с поверхности катода.
- Сила эмиссионного тока быстро нарастает с повышением разности потенциалов  $U$ .
- Катод специально не разогревается, поэтому эмиссия и называется холодной.
- **Закон Чайльда - Ленгмюра**

$$j = A E^{3/2}$$

- Плотность тока АЭЭ равна

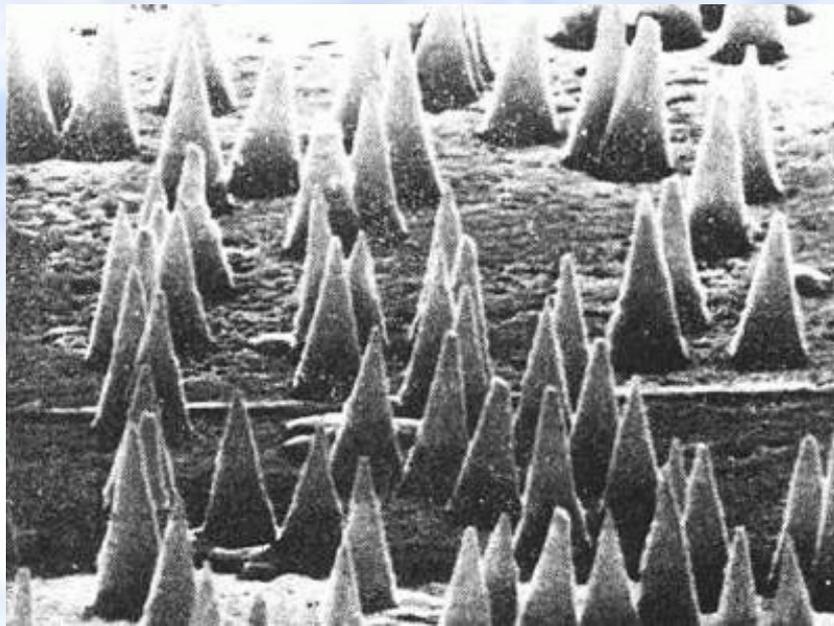
$$j = A E^{3/2} \leq 10^8 \text{ А см}^{-2},$$

где  $A = \frac{4}{9} \varepsilon_0 \left( \frac{2e}{m} \right) E^{3/2} r^{-1/2}$  – коэффициент

пропорциональности, определяемый геометрией и материалом катода.

- Проще говоря, **закон Чайльда-Ленгмюра показывает, что плотность тока пропорциональна  $E^{3/2}$  (закон трех вторых).**

• Электронная микрофотография эмиттера с острой поверхностью, полученного в г. Дубне с использованием современных трековых методик. Острия – конусы высотой 6,6 мкм, диаметром 1,5 мкм. Радиус кривизны вершины 0,1 мкм. Концентрация  $10^7 \text{ см}^{-2}$



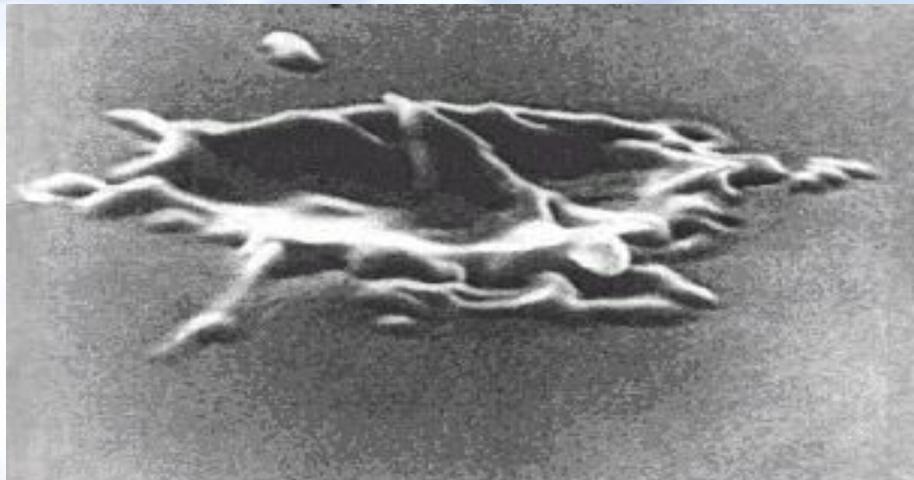
## ***Взрывная электронная эмиссия (ВЭЭ).***

При плотности тока  $10^8$  А/см<sup>2</sup> и большой концентрации энергии  $10^4$  Дж·м<sup>-1</sup> микроострия начинают взрываться и разрушаться.

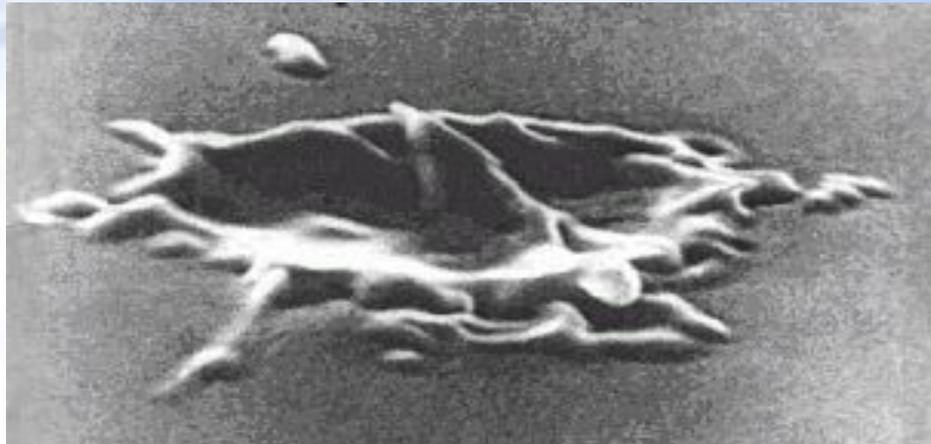
- Иницируется качественно иной вид эмиссии, обусловленный ***взрывом микроострий на катодe.***
- Ток электронов, на порядки превосходит начальный ток ААЭ – ***наблюдается взрывная электронная эмиссия (ВЭЭ).***
- ВЭЭ была открыта и изучена в Томском политехническом институте в **1966** г. коллективом сотрудников под руководством **Г.А. Месяца.**



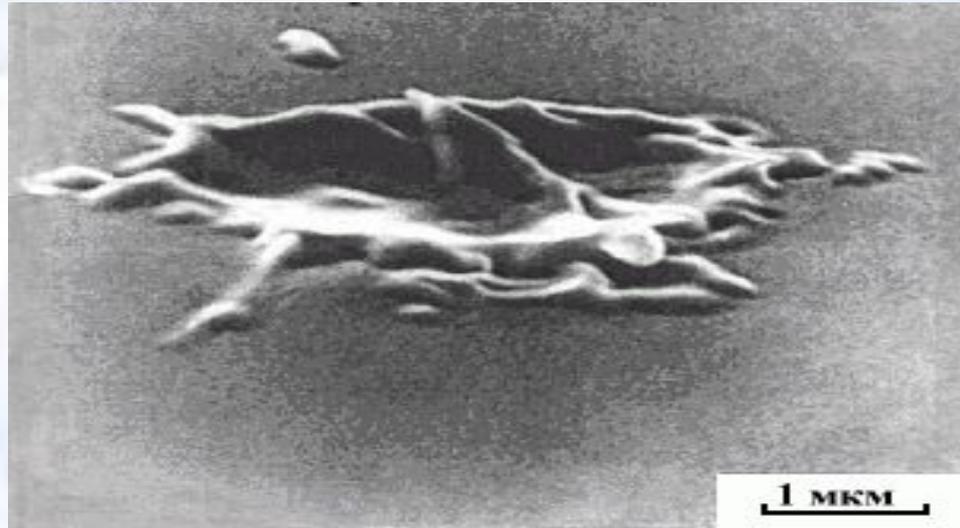
- **ВЭЭ** – это единственный вид электронной эмиссии, позволяющий получить потоки электронов мощностью до  $10^{13}$  Вт с плотностью тока до  $10^9$  А/см<sup>2</sup>.
- Ток ВЭЭ необычен по структуре. Он состоит из отдельных порций электронов  $10^{11} \div 10^{12}$  штук, имеющих характер электронных лавин, получивших название **эктонов** (начальные буквы «*explosive centre*»).
- Время образования лавин  $10^{-9} \div 10^{-8}$  с.



- Появление электронов в **эктоне** вызвано быстрым перегревом микроучастков катода и является, по существу, разновидностью термоэлектронной эмиссии.
- Прекращение эмиссии электронов в эктоне обусловлено охлаждением зоны эмиссии за счет теплопроводности, уменьшения плотности тока, испарения атомов.



- Существование эктона проявляется в образовании кратера на поверхности катода.

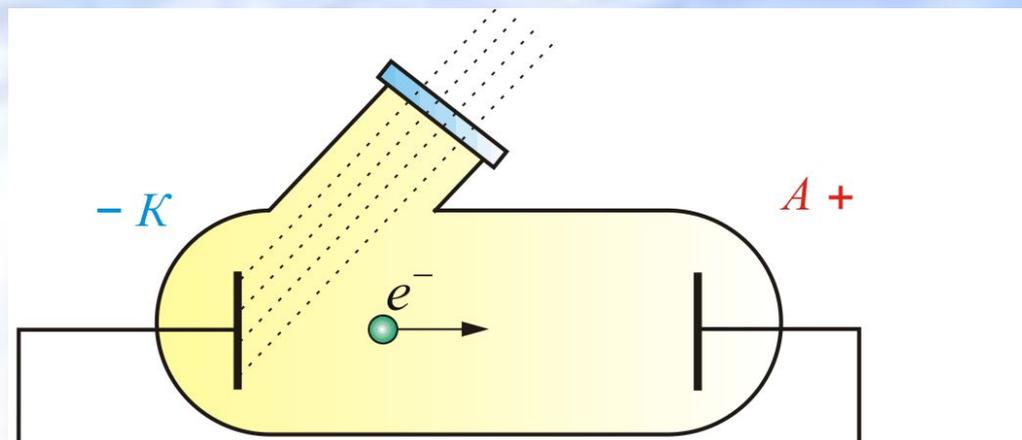


- Взрывная эмиссия электронов и эктоны играют фундаментальную роль в вакуумных искрах и дугах, в разрядах низкого давления, в сжатых и высокопрочных газах, в микропромежутках, т.е. там, где в наличии есть электрическое поле высокой напряженности на поверхности катода.

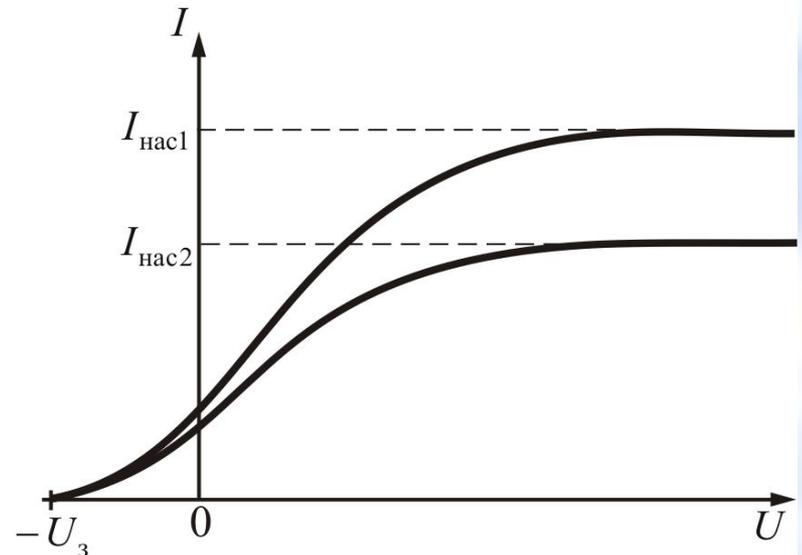
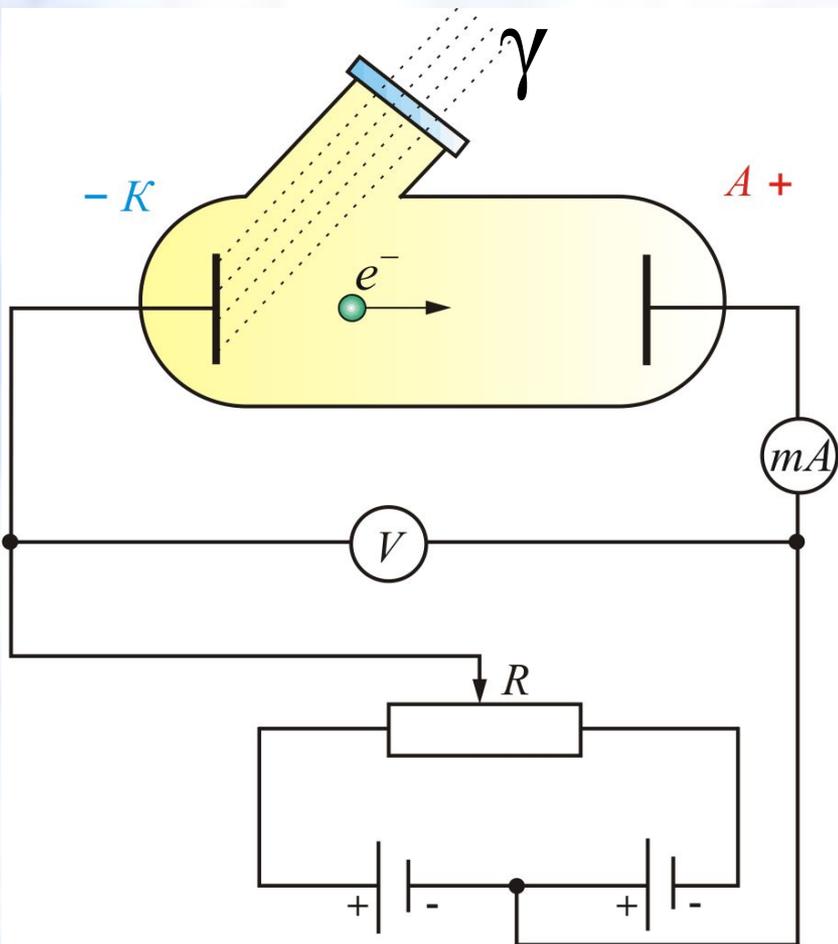
- Явление взрывной электронной эмиссии послужило основой для создания импульсных электрофизических установок, таких как **сильноточные ускорители электронов**, мощные импульсные и рентгеновские устройства, мощные релятивистские сверхвысокочастотные генераторы.
- Например, **импульсные ускорители электронов** имеют **мощность  $10^{13}$  Вт** и более при длительности импульсов  **$10^{-10} \div 10^{-6}$  с**, **токе электронов  $10^6$  А** и **энергии электронов  $10^4 \div 10^7$  эВ**.
- Такие пучки широко используются для исследований в физике плазмы, радиационной физике и химии, для накачки газовых лазеров и пр.

## 6.1.3. Фотоэлектронная эмиссия

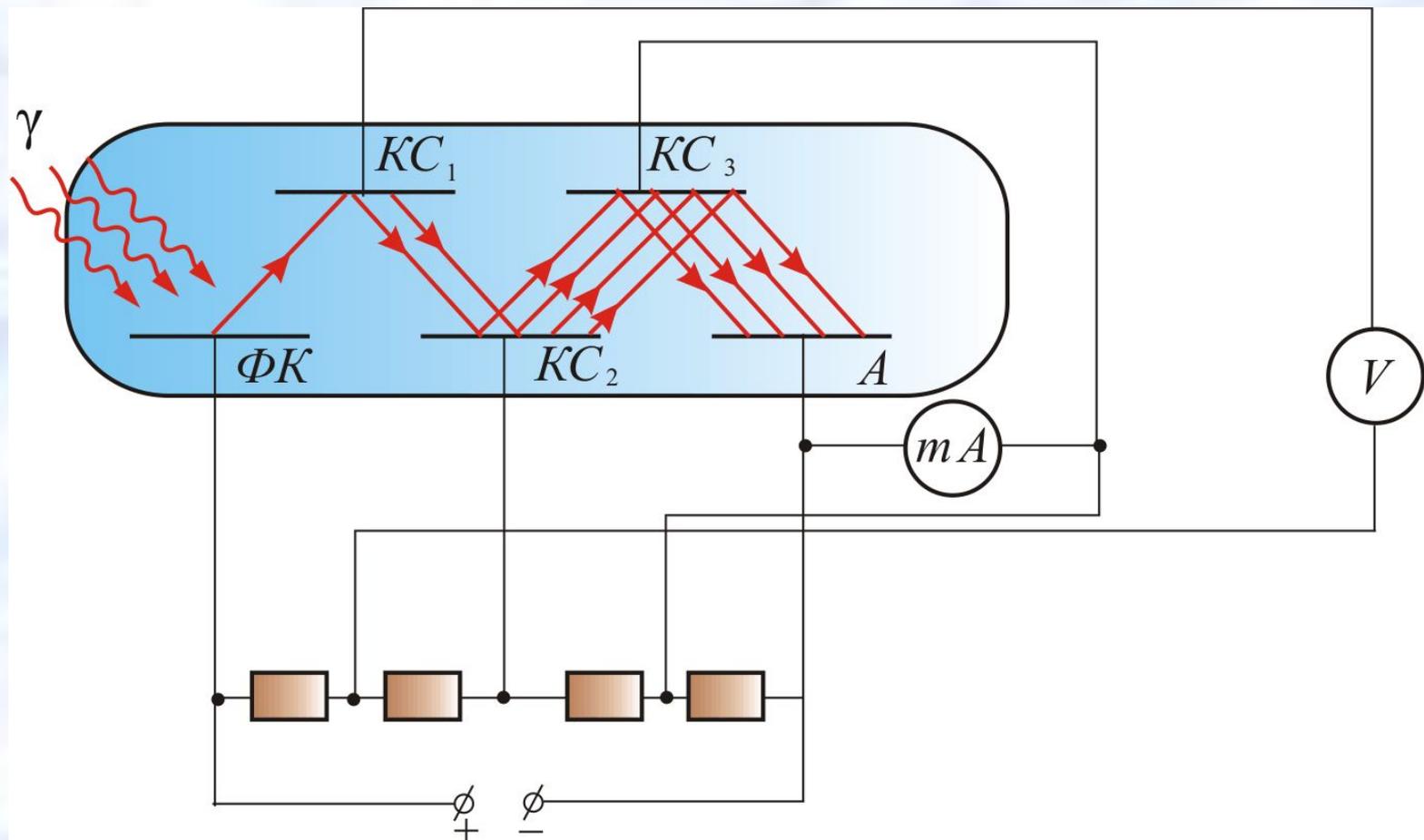
- **Фотоэлектронная эмиссия (фотоэффект)** заключается в «выбивании» электронов из металла при действии на него электромагнитного излучения.



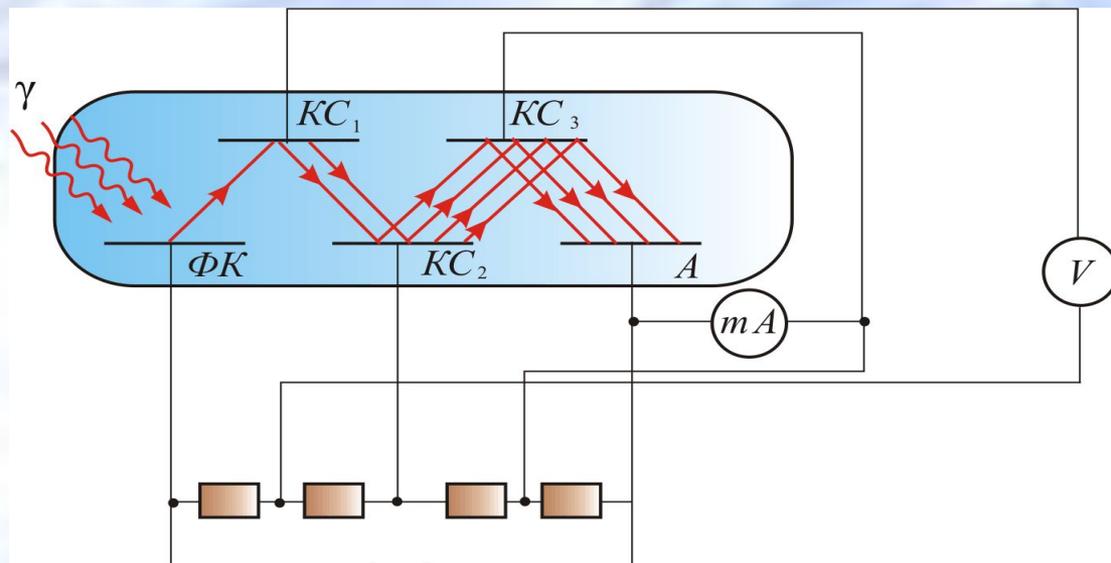
- **Схема установки** для исследования фотоэффекта и **ВАХ** аналогичны термоэмиссии. Здесь, вместо разогрева катода, на него направляют поток фотонов



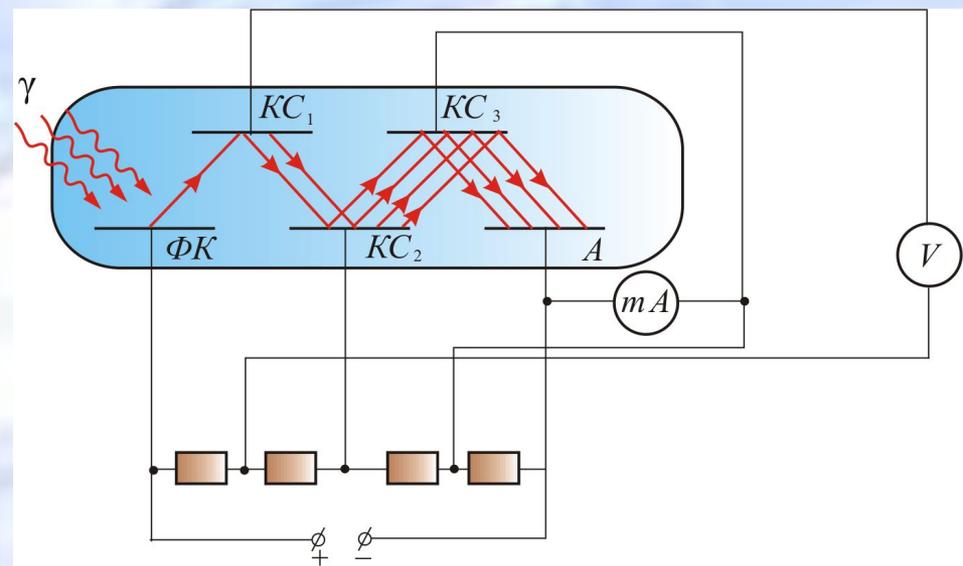
- В физических приборах, регистрирующих  $\gamma$ -излучение, используют **фотоэлектронные умножители (ФЭУ)**.  
Схема прибора приведена на рисунке.



- В ФЭУ используют **два эмиссионных эффекта: фотоэффект и вторичную электронную эмиссию**, которая заключается в выбивании электронов из металла при бомбардировке последнего другими электронами.
- Электроны выбиваются светом из фотокатода ( $\Phi K$ ).
- Ускоряясь между  $\Phi K$  и первым эмиттером ( $KC_1$ ), они приобретают энергию, достаточную, чтобы выбить большее число электронов из следующего эмиттера

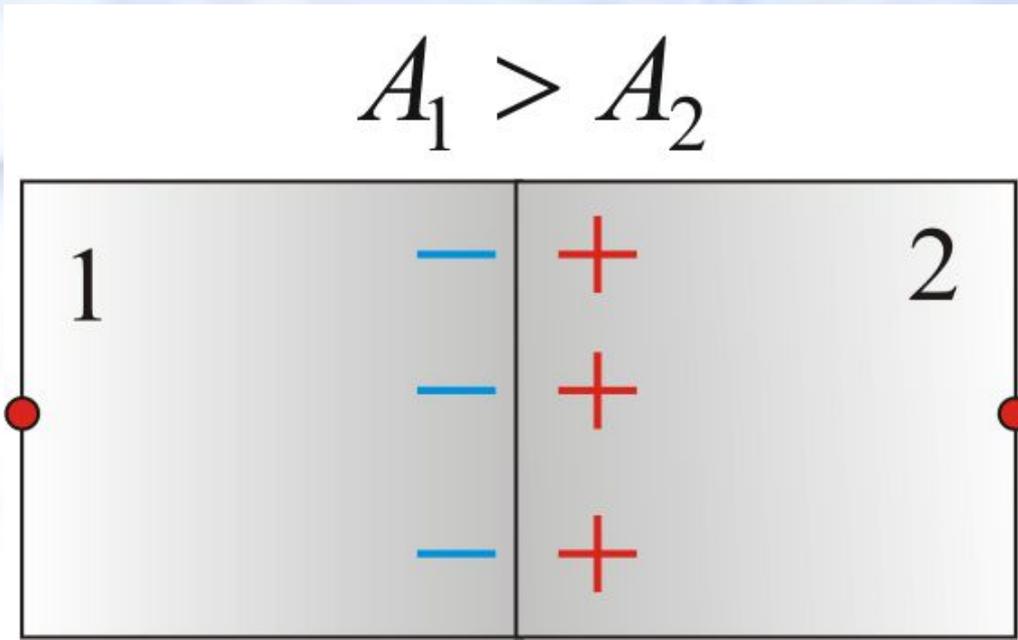


- Умножение электронов происходит за счет увеличения их числа при последовательном прохождении разности потенциалов между соседними эмиттерами.
- Последний электрод называют коллектором.
- Регистрируют ток между последним эмиттером и коллектором.
- Таким образом, ФЭУ служит усилителем тока, а последний пропорционален излучению, попадающему на фотокатод, что и используют для оценки радиоактивности.

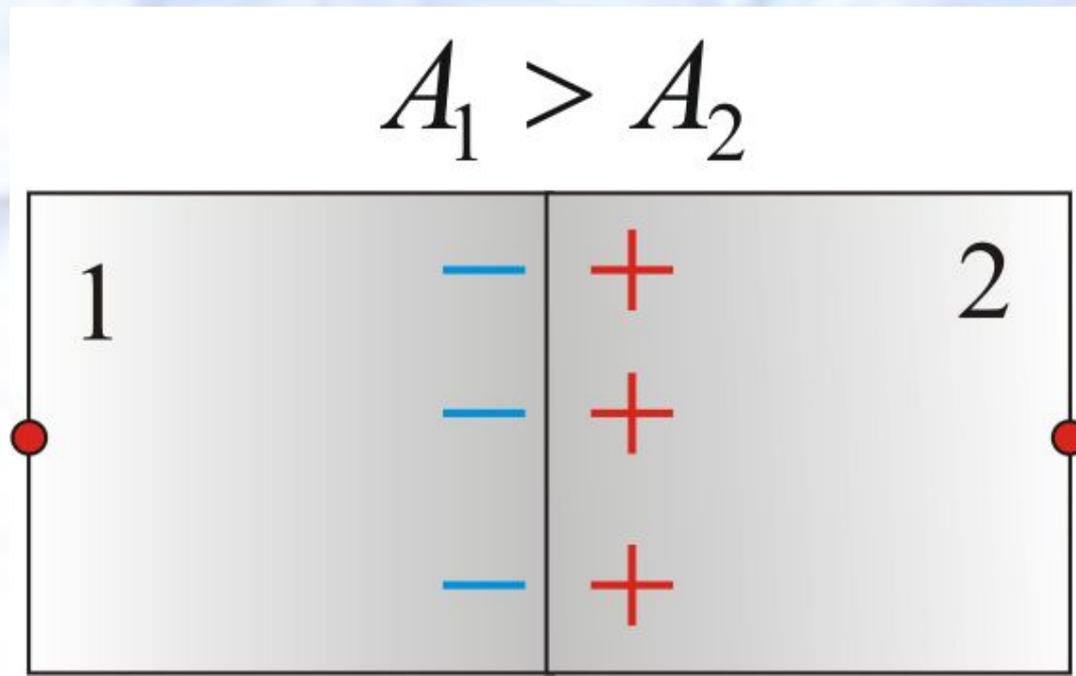


## 6.2. Контактные явления на границе раздела двух проводников

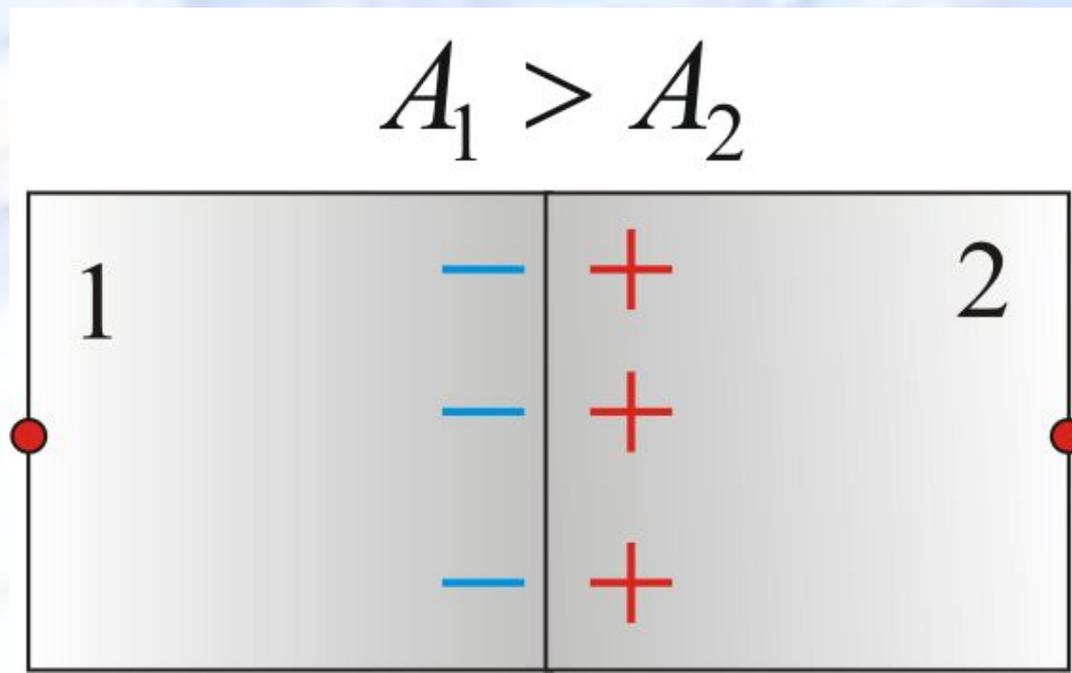
- Как показывает опыт, *на контакте двух различных металлов образуется двойной электрический слой* и соответствующая разность потенциалов:



- Появление двойного электрического слоя обусловлено **различием работ выхода электронов из металлов.**
- Чем она больше, тем меньше вероятность перехода электронами границы раздела.
- Поэтому со стороны металла с большей работой выхода накапливается отрицательный заряд, а с противоположной – положительный.

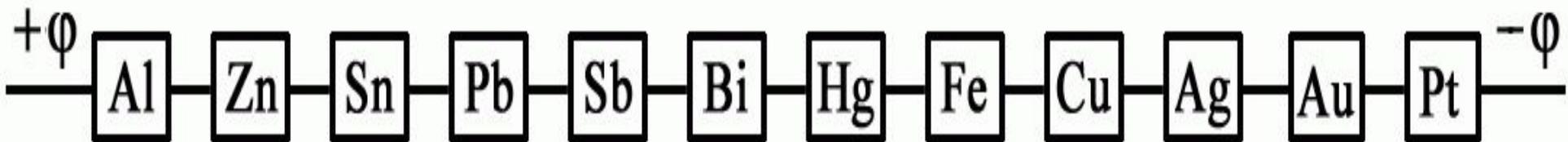


■ Это явление наблюдалось итальянским физиком **Алессандро Вольта** (1745 – 1827), который сформулировал два экспериментальных закона, известных как законы Вольта



# Законы Вольты

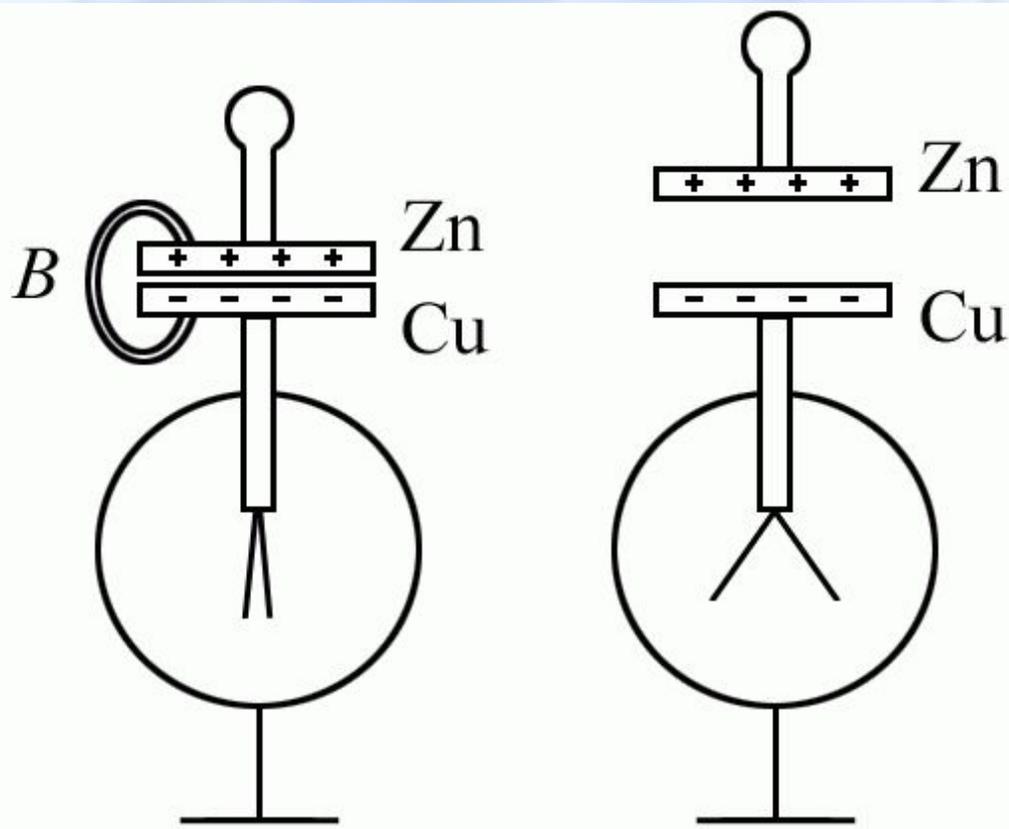
- 1. На контакте двух разных металлов возникает разность потенциалов, которая зависит от химической природы и от температуры спаев.
- 2. Разность потенциалов на концах последовательно соединенных проводников не зависит от промежуточных проводников и равна разности потенциалов, возникающей при соединении крайних проводников при той же температуре (закон последовательных контактов Вольта).



## Ряд Вольты.

Потенциал каждого последующего металла в этом ряду ниже потенциала предыдущего

Опыт Вольты по доказательству существования контактной разности потенциалов

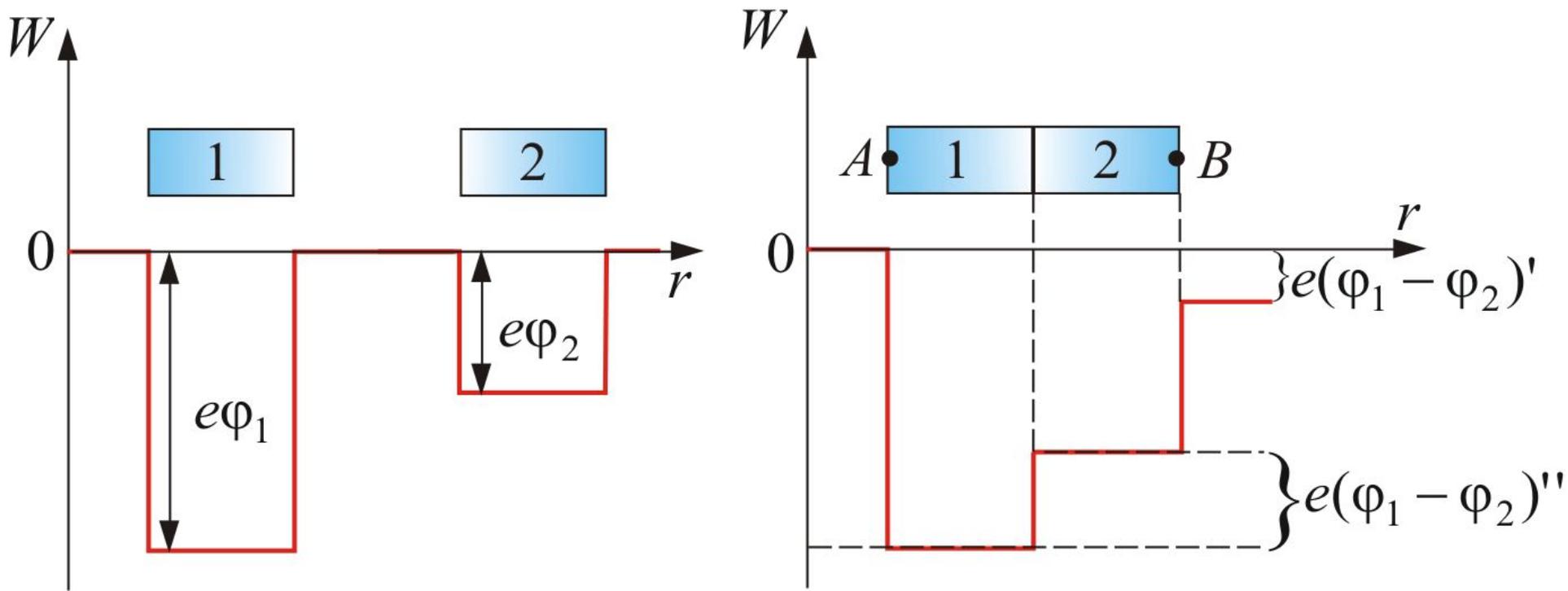


- Результаты эксперимента можно объяснить с позиции **классической электронной теории**.
- Если принять, что потенциал за пределами металла равен нулю, то **энергия электрона внутри металла с потенциалом  $\varphi_i$  определится выражением**

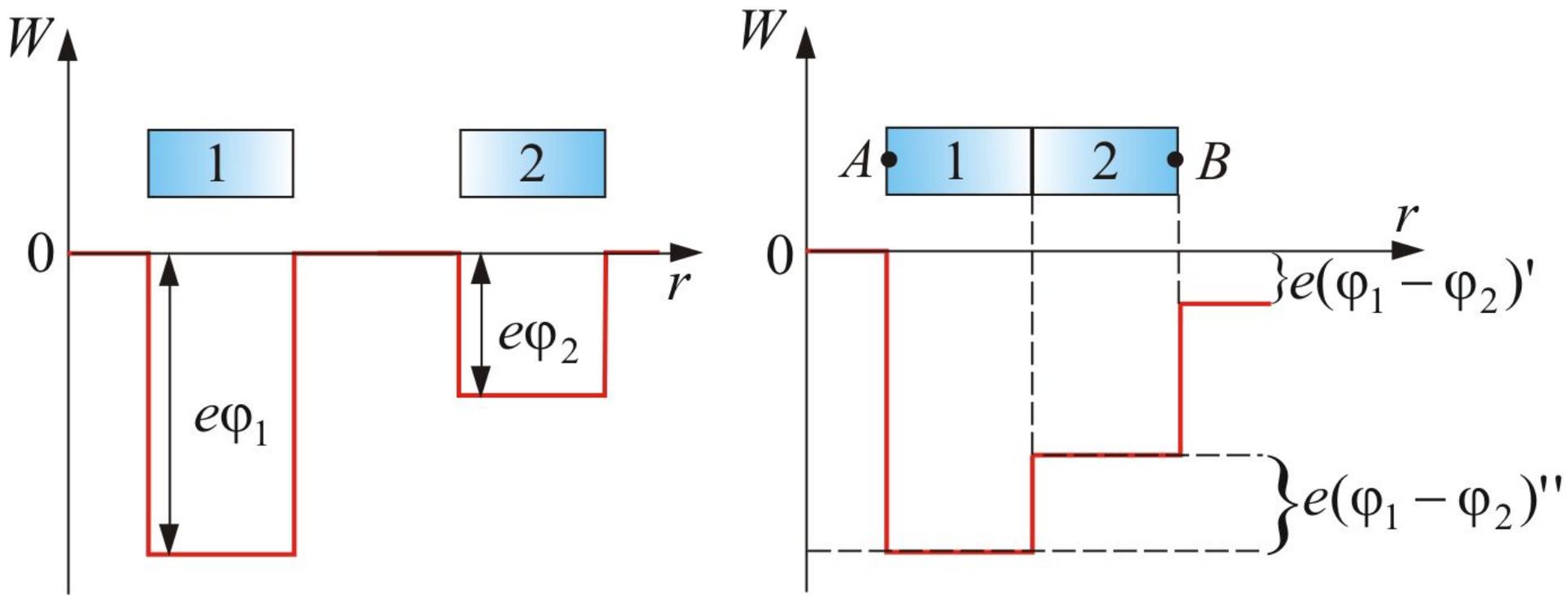
- $$W_i = e\varphi_i. \quad (6.2.1)$$

- При соединении двух разных металлов с работами выхода  $A_2 = e\varphi_2$   $A_1 = e\varphi_1$  возникает избыточный переход электронов из второго металла в первый, так как

$$A_2 < A_1.$$



- В результате концентрация электронов  $n_1$  в металле 1 увеличивается, по сравнению с  $n_2$ , что порождает обратный избыточный поток электронного газа за счет диффузии, противоположный потоку, обусловленному разностью работ выхода.



- Установившуюся разность потенциалов можно найти из выражения:

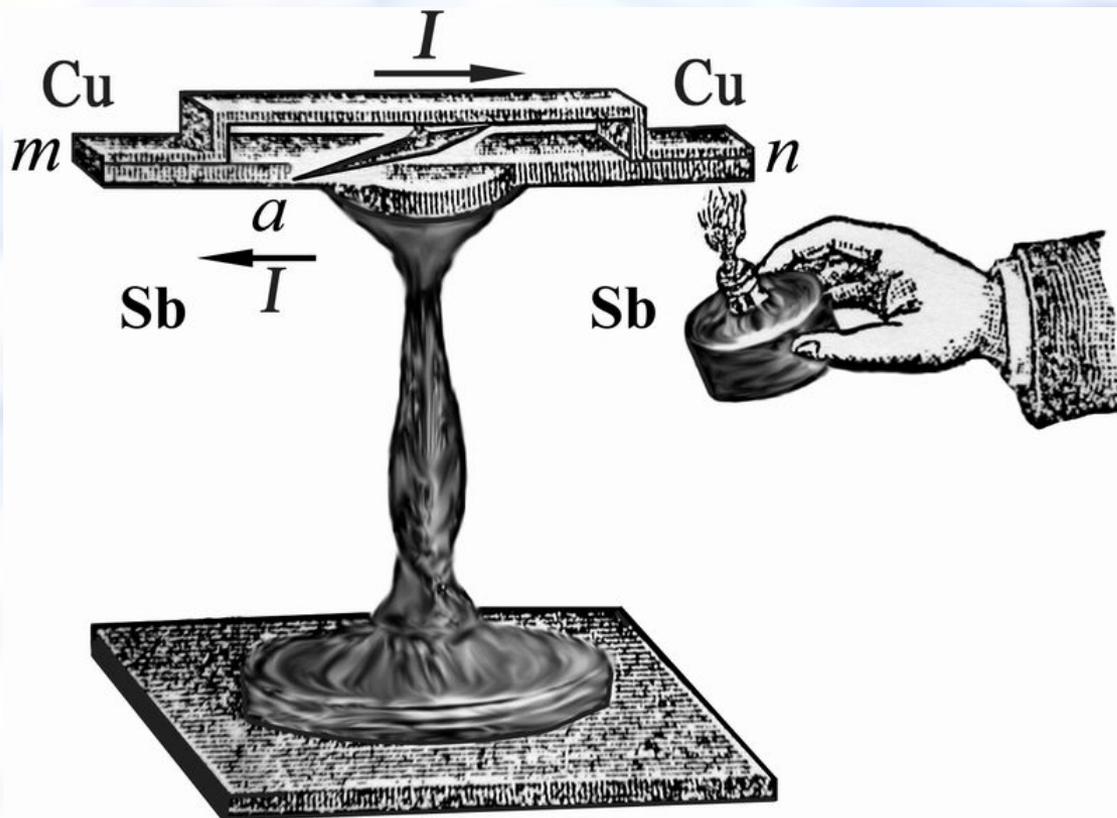
$$(\varphi_1 - \varphi_2) = -\frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}.$$

- *Явление возникновения контактной разности потенциалов и ее зависимость от температуры называют **прямым термоэлектрическим эффектом** или **эффектом Зеебека***

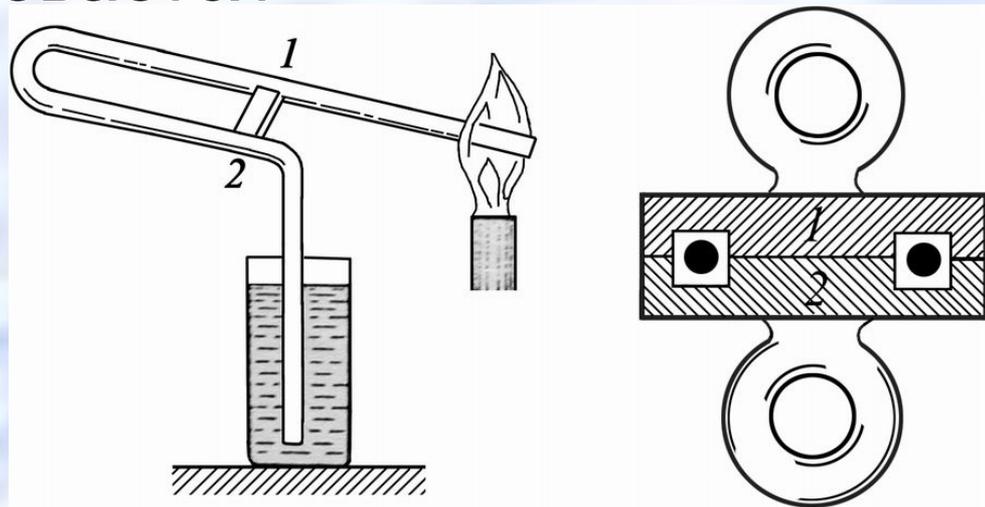
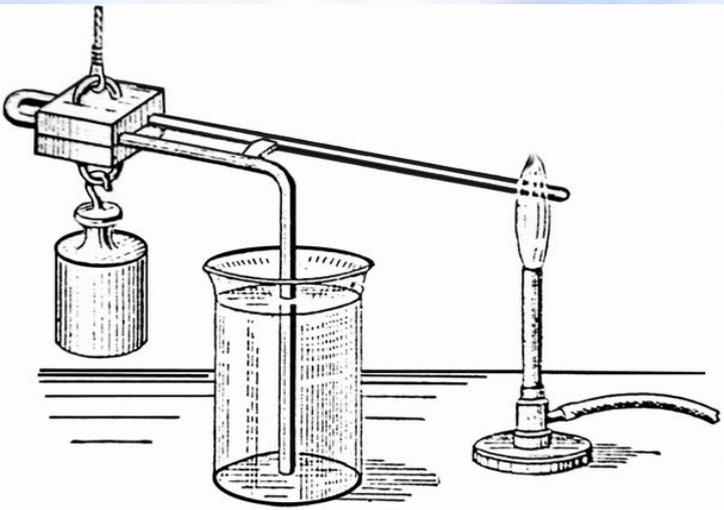
# Эффект Зеебека

*(прямой термоэлектрический эффект)*

заключается в появлении разности потенциалов в термопарах.

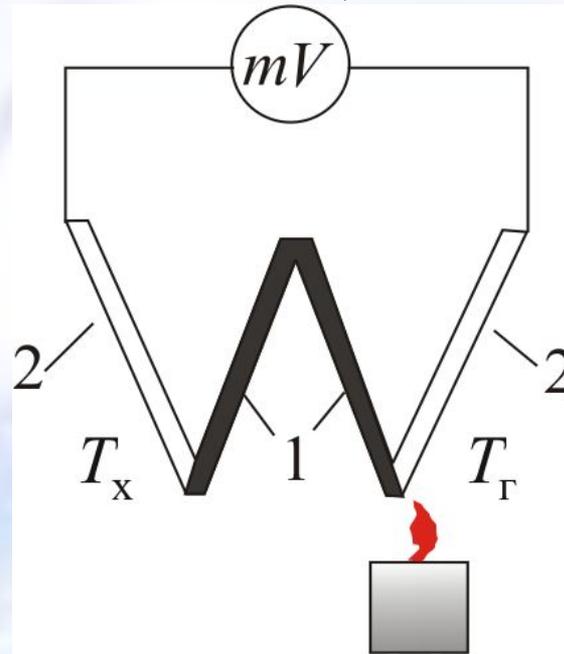


- Эффективная демонстрация термоэлектрического тока может быть осуществлена в опыте, приведенном на рис.
- Толстая U-образная медная дуга перекрывается коротким мостиком 1–2 из константана или железа. Место спая 1 разогревается



Электромагнит, питаемый током термоэлемента, способен удерживать гирю весом в несколько килограммов

- **Схема термопары** состоящей из спая двух разных металлов 1 и 2, показана на рисунке.



- На концах термопары возникает термоЭДС :

$$E = \frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} (T_{\text{Х}} - T_{\Gamma}) = \alpha (T_{\Gamma} - T_{\text{Х}}),$$

$$E = \alpha (T_{\Gamma} - T_{\text{Х}}),$$

где  $T_{\Gamma}$  – температура горячего спая и  $T_{\text{Х}}$  – температура холодного спая.

- Таким образом – **термоЭДС термопары:**

$$E = \alpha(T_{\Gamma} - T_{\text{X}})$$

- – **постоянная термопары:**

$$\alpha = \frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}$$

## Эффектом Пельтье

### обратный термоэлектрический эффект.

- Он заключается в том, что при пропускании тока через термопару, ее спай поглощает или выделяет тепло в зависимости от направления тока.
- Количество поглощенного тепла пропорционально плотности тока.

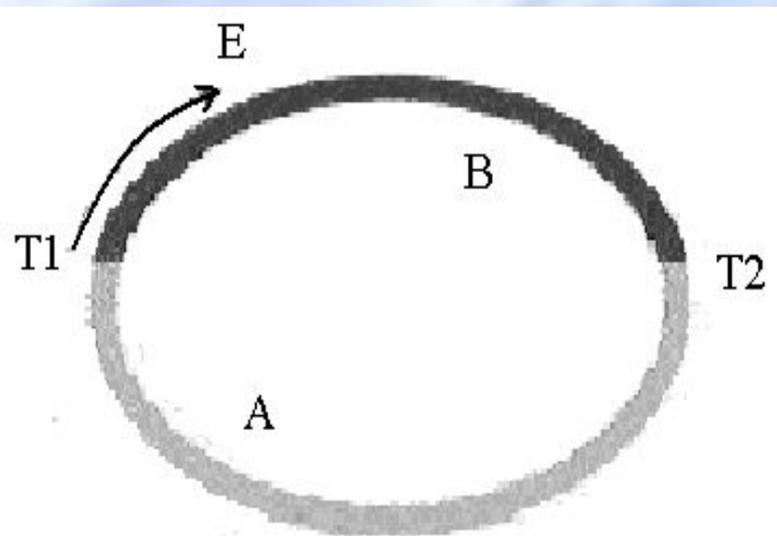
$$Q_{\Pi} = \Pi_{12} j \quad (6.2.4)$$

- где  $\Pi_{12}$  – **коэффициент Пельтье**, зависящий от материала контактирующих металлов.

# ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОПАР

# ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

- Термопары относятся к классу термоэлектрических преобразователей, принцип действия которых основан на явлении Зеебека:
- если спаи двух разнородных металлов, образующих замкнутую электрическую цепь, имеют неодинаковую температуру ( $T_1$  не равно  $T_2$ ), то в цепи протекает электрический ток.



- Таким образом, термопара может образовывать устройство, использующее термоэлектрический эффект для измерения температуры.
- В сочетании с электроизмерительным прибором термопара образует термоэлектрический термометр.
- Измерительный прибор или электронную измерительную систему подключают либо к концам термоэлектродов (рис. 2,а), либо в разрыв одного из них (рис. 2,б).

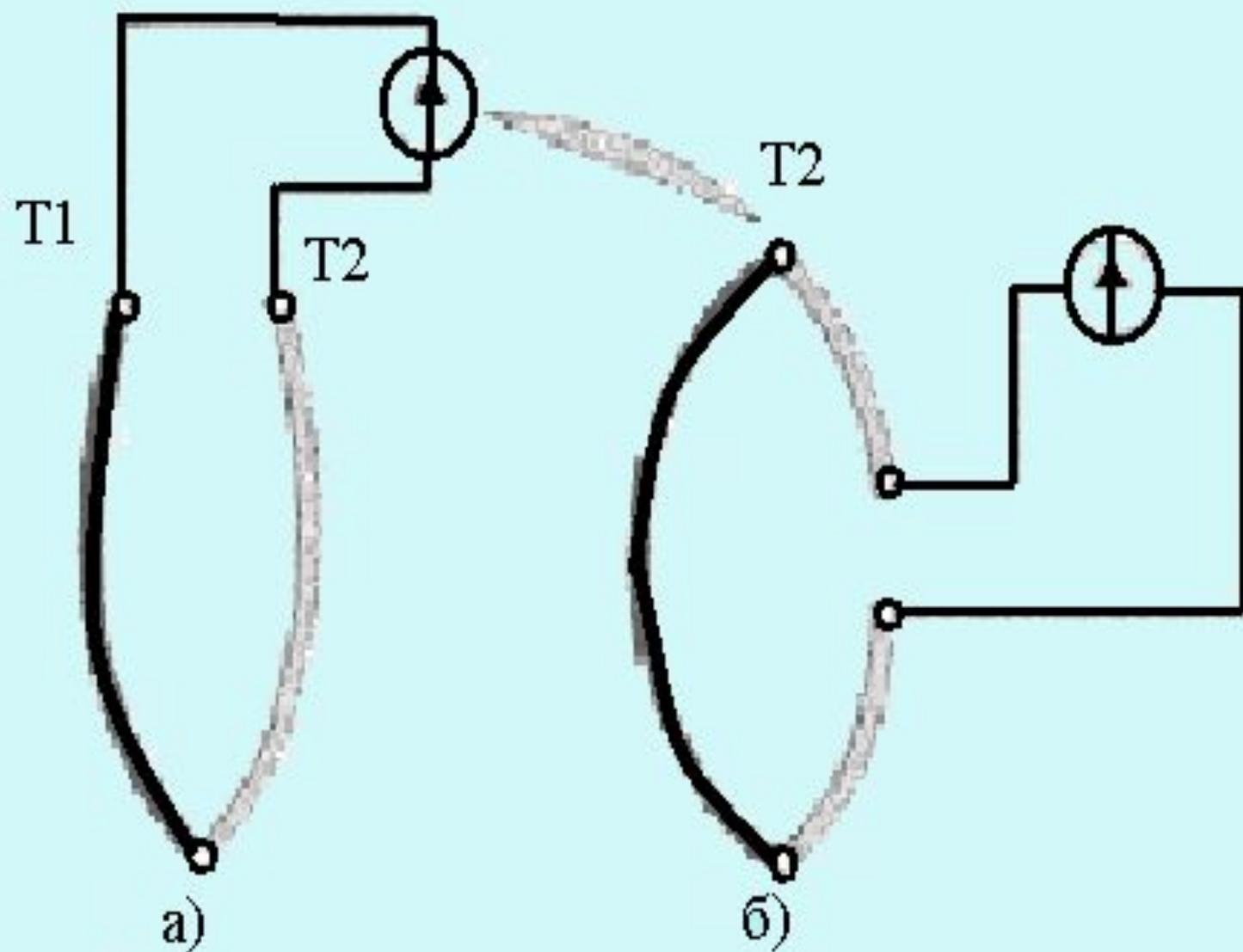
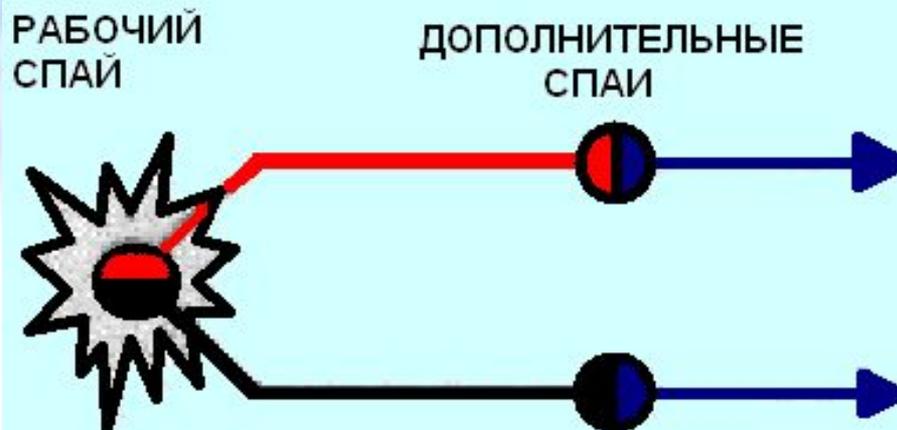


Рис.2 (а,б) Подключение термопар к измерительному прибору

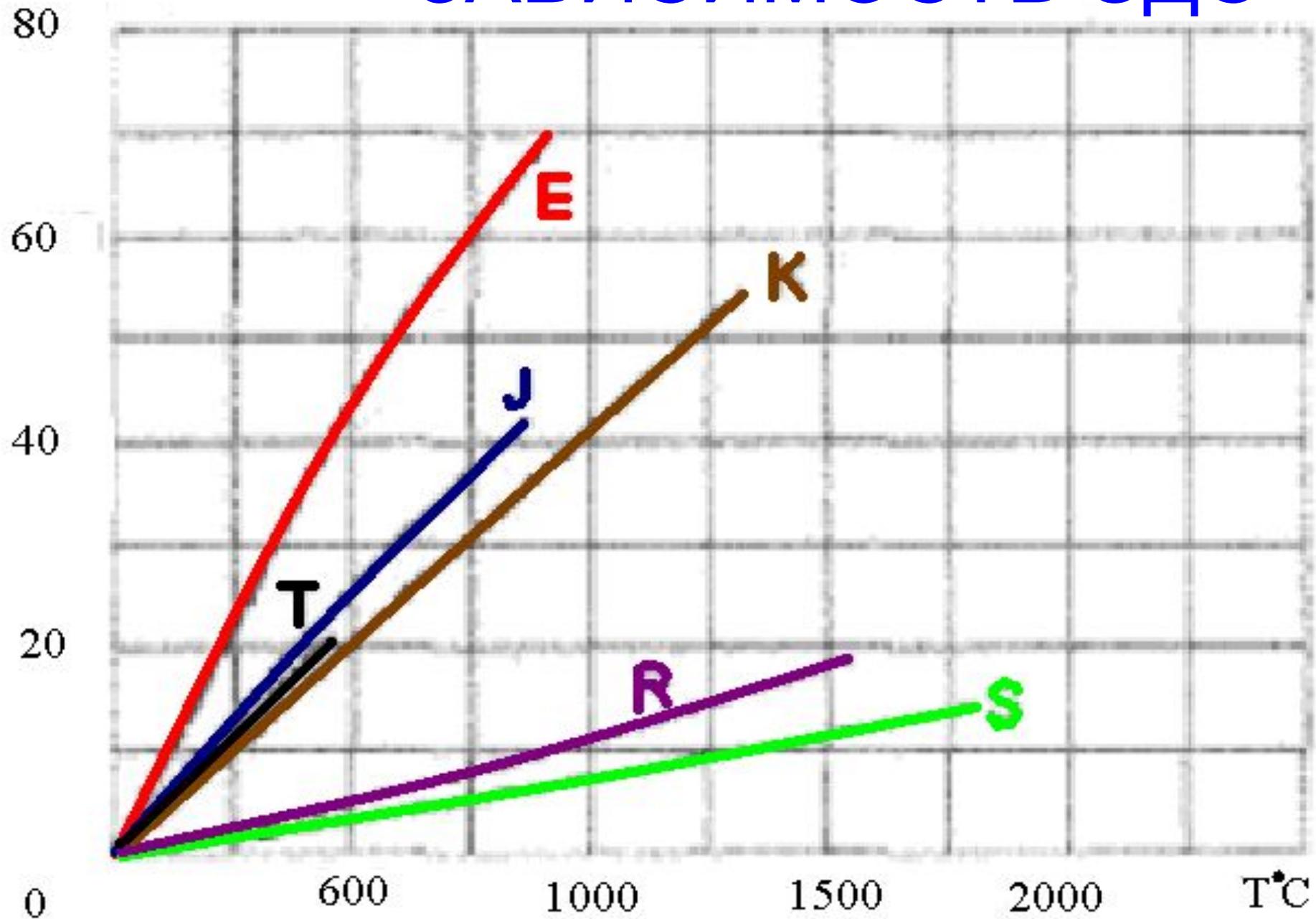
- В местах подключения проводников термопары к измерительной системе возникают дополнительные термоЭДС.
- В результате их действия на вход измерительной системы фактически поступает сумма сигналов от рабочей термопары и от «термопар», возникших в местах подключения.
- Существуют различные способы избежать этого эффекта. Самым очевидным из них является поддержание температуры холодного спая постоянной.



# Основные параметры термопар промышленного типа

Обоз. Термо- электро- дов	Материалы	Пределы измерения при длительном применении	Верхний предел измерений при кратковременном применении
ПП-1	Платинородий (10% родия)	От -20 до 1300°C	1600°C
ПР-30	Платинородий (30% родия)	300-1600°C	1800°C
ХА	Хромель-алюмель	-50-1000°C	1300°C
ХК	Хромель-копель	-50-600°C	800°C

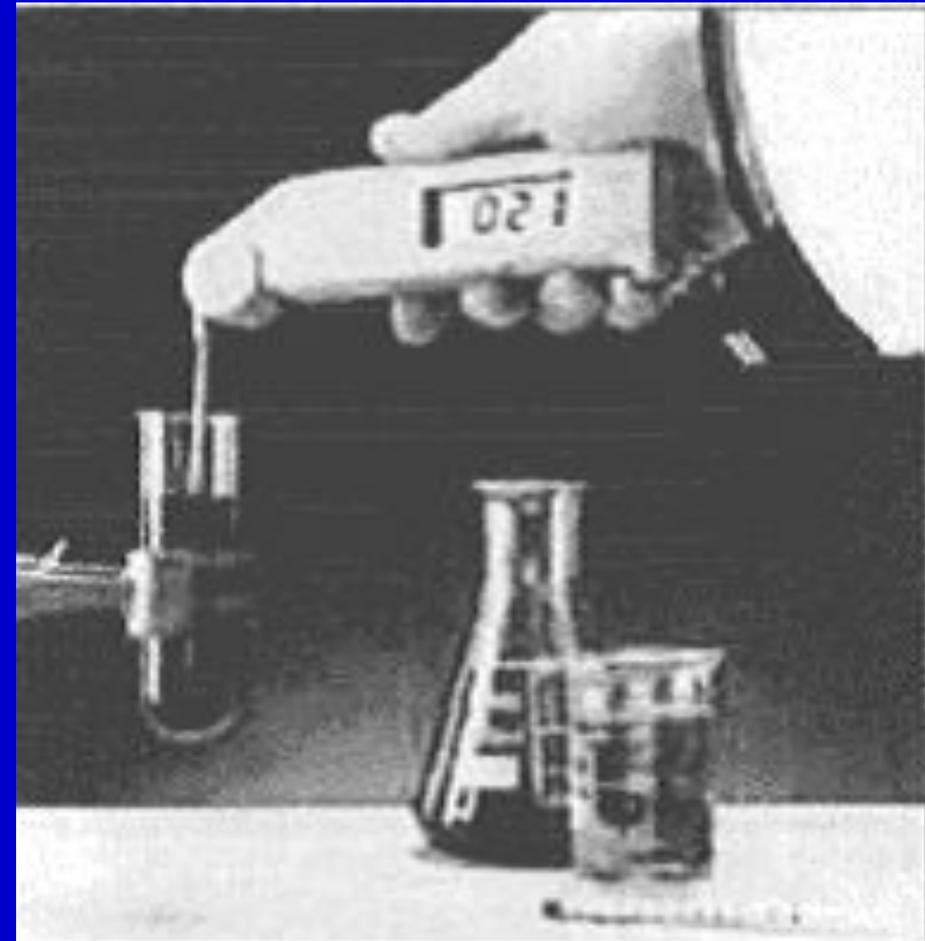
# ЗАВИСИМОСТЬ ЭДС



# ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ

- Отечественная промышленность выпускает электронные термометры для измерения температуры контактным способом.
- Так, например, одно из отечественных предприятий наладило производство серии измерителей температуры, каждый из которых состоит из электронного блока и набора сменных датчиков температуры, представляющих собой стандартные хромель-алюмелевые термопары (тип К)

# ВНЕШНИЙ ВИД



Миниатюрный и контактный  
термометр

# ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ

- **Надежность конструкции датчика, возможность работы в широком диапазоне температур, простота, удобство монтажа, возможность измерения локальной температуры, малая инерционность.**
- **Необходимость поддержания температуры холодного спая постоянной и нелинейность на некоторых участках.**

# ПРИМЕНЕНИЕ

**Измерение температур с помощью термопар получило широкое распространение для измерения температуры различных объектов, а также в автоматизированных системах управления и контроля.**

Лекция окончена

