

## Туннельный эффект (*физика*)

(решение задач блока ФИЗИКА, как и других блоков, позволит отобрать ТРЕХ человек на очный тур, набравших при решении задач ЭТОГО блока наибольшее количество баллов. Дополнительно по результатам очного тура эти претенденты будут бороться за специальную номинацию «Физика наносистем». На очный тур будет отобрано также еще 5 человек, набравших наибольшее абсолютное количество баллов, поэтому после решения задач по своей специальности есть полный смысл решать задачи из других блоков.)

Одним из основных отличий наноструктур от макроскопических тел является зависимость их химических и физических свойств от размера. Наглядным примером этого служит туннельный эффект, который заключается в проникновении легких частиц (электрона, протона) в области, недоступные для них энергетически. Этот эффект играет важную роль в таких процессах как например перенос заряда в фотосинтетических устройствах живых организмов (стоит заметить, что биологические реакционные центры являются одними из наиболее эффективных наноструктур).

Туннельный эффект можно объяснить волновой природой легких частиц и принципом неопределенности. Благодаря тому, что частицы малого размера не имеют определенного положения в пространстве, для них не существует понятия траектории. Следовательно, для перемещения из одной точки в другую частица не должна проходить по линии, их соединяющей, и таким образом может «обходить» области, запрещенные по энергии. В связи с отсутствием у электрона точной координаты, его состояние описывают с помощью волновой функции, характеризующей распределение вероятности по координате. На рисунке показан типичный вид волновой функции при туннелировании под энергетический барьер.

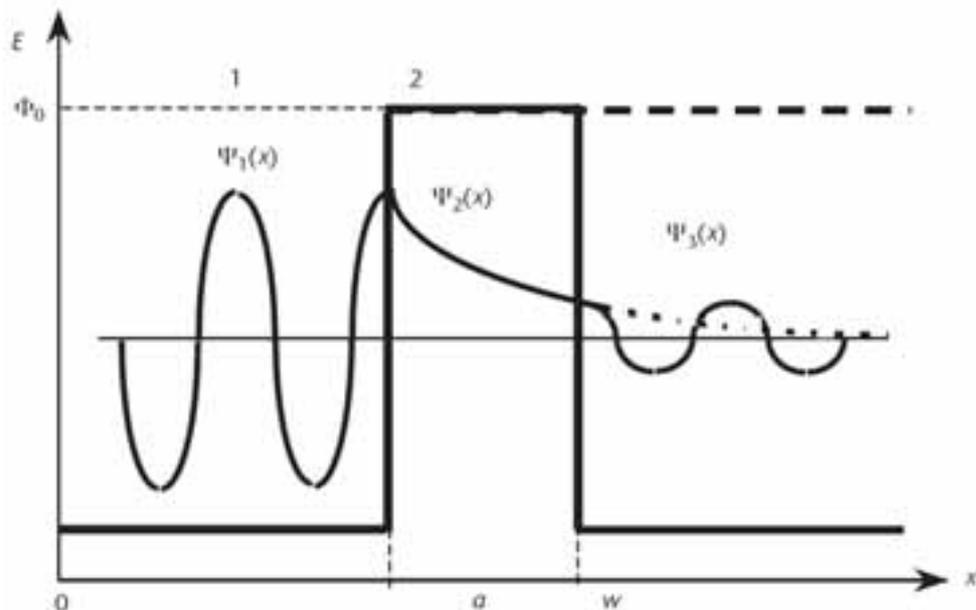


Рис. Волновая функция в случае, если энергия частицы меньше высоты барьера.

Вероятность  $p$  проникновения электрона сквозь потенциальный барьер зависит от высоты  $U$  и ширины последнего  $l$ :

$$p = \exp\left(-\frac{2l}{\hbar} \sqrt{2m(U-E)}\right)$$

где  $m$  – масса электрона,  $E$  – энергия электрона,  $\hbar$  – постоянная Планка с чертой.

1. Определите вероятность, того что электрон туннелирует на расстояние 0.1 нм, если разность энергий  $U - E = 1$  эВ (2 балла). Рассчитайте разность энергий (в эВ и

кДж/моль), при которой электрон сможет туннелировать на расстояние 1 нм с вероятностью 1% (2 балла).

Одним из наиболее заметных следствий туннельного эффекта является необычная зависимость константы скорости химической реакции от температуры. При уменьшении температуры константа скорости стремится не к 0 (как можно ожидать из уравнения Аррениуса), а к постоянному значению, которое определяется вероятностью туннелирования ядер  $p$ .

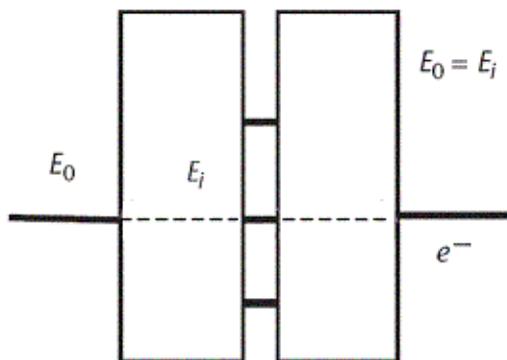
$$k(T) \approx A \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) + Ap,$$

где  $A$  – предэкспоненциальный множитель,  $E_A$  – энергия активации. Это можно объяснить тем, что при высоких температурах в реакцию вступают только те частицы, энергия которых выше энергии барьера, а при низких температурах реакция идет исключительно за счет туннельного эффекта.

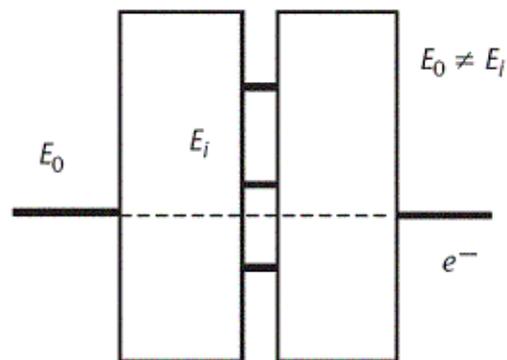
2. Из приведенных ниже экспериментальных данных определите энергию активации и вероятность туннелирования (3 балла).

$T, \text{K}$	$k(T), \text{c}^{-1}$
78	$4.5 \cdot 10^{-3}$
200	$6.0 \cdot 10^{-3}$
273	2.5

В современных квантовых электронных устройствах используется эффект резонансного туннелирования. Этот эффект проявляется, если электрон встречает два барьера, разделенные потенциальной ямой. Если энергия электрона совпадает с одним из уровней энергии в яме (это – условие резонанса), то общая вероятность туннелирования определяется прохождением через два тонких барьера, если же нет – то на пути электрона встает широкий барьер, который включает потенциальную яму, и общая вероятность туннелирования стремится к 0.



Резонансное туннелирование



Нерезонансное туннелирование

3. Сравните вероятности резонансного и нерезонансного туннелирования электрона при следующих параметрах: ширина каждого из барьеров 0.5 нм, ширина ямы между барьерами 2 нм, высота всех потенциальных барьеров относительно энергии электрона равна 0.5 эВ (3 балла). В каких устройствах используется принцип туннелирования (3 балла)?