

### 3. ВОЛНЫ де БРОЙЛЯ

Дебройлевская длина волны движущейся частицы:  $\lambda = \frac{h}{m \cdot V}$ , где

$h$ -постоянная Планка,  $m$ -масса частицы,  $V$ -ее скорость.

3.1. Какую энергию нужно дополнительно сообщить электрону, чтобы его дебройлевская длина волны уменьшилась от 200 пм до 150 пм? Ответ: 28,9 эВ.

3.2. Электрон обладает кинетической энергией 30 эВ. Определить дебройлевскую длину волны электрона. Во сколько раз изменится эта длина волны, если кинетическая энергия уменьшится на 20%? Ответ:  $2,2 \cdot 10^{-10}$  м; 1,12.

3.3. Вычислить дебройлевские длины волн электрона, протона и атома урана, имеющих одинаковые кинетические энергии 200эВ. Ответ: 87 пм; 2 пм; 0,13 пм.

3.4. Найти дебройлевские длины волн для молекул азота и водорода, имеющих наиболее вероятные скорости при нормальных условиях. Ответ:  $3,5 \cdot 10^{-11}$  м;  $13,2 \cdot 10^{-11}$  м.

3.5. Дебройлевская длина волны протона при его ускорении в электрическом поле уменьшилась от  $10^{-10}$  м до  $3 \cdot 10^{-11}$  м. На сколько увеличилась энергия протона? Ответ: 0,83 эВ.

3.6. Какова дебройлевская длина волны электрона, имеющего кинетическую энергию 1 МэВ? Ответ: 0,12 пм.

3.7. Вычислить дебройлевские длины волн для электрона и протона, прошедших одинаковую ускоряющую разность потенциалов 10 В. Ответ: 390 пм; 9,1 пм

3.8. На какую величину и на сколько процентов по отношению к нормальным условиям должна измениться температура идеального газа, чтобы дебройлевская длина волны его молекул уменьшилась на 10% ? Ответ: 64К; 23%.

3.9. Какую ускоряющую разность потенциалов в электрическом поле должна пройти  $\alpha$ -частица, чтобы ее дебройлевская длина волны уменьшилась от 180 пм до 50 пм ? Ответ: 0,04 В.

3.10.  $\alpha$ -частица была ускорена в электрическом поле с разностью потенциалов  $\Delta\phi$ . При этом на выходе из поля ее дебройлевская длина волны оказалась равной 2,62 пм. Какую дебройлевскую длину волны будет иметь позитрон, если его ускорить в этом же электрическом поле ? Ответ: 31,6 пм.

3.11. Какую ускоряющую разность потенциалов должен пройти релятивистский электрон, чтобы его дебройлевская длина волны оказалась равной 1,8 пм? Ответ: 350 кВ.

3.12. Найти дебройлевскую длину волны протонов, движущихся со скоростью  $0,9c$  (где  $c$  – скорость света). Во сколько раз изменится эта длина волны, если кинетическая энергия протона уменьшится в 1000 раз? Ответ:  $6,3 \cdot 10^{-16}$  м; 41.

3.13. Атом водорода, находящийся первоначально в основном состоянии, поглотил фотон с энергией 17 эВ. Какую дебройлевскую длину волны будет иметь выбитый электрон вдали от атома? Ответ: 66,7 нм.

3.14. Фотон с длиной волны 82 нм ионизирует атом водорода, который находился в невозбужденном состоянии. Какую дебройлевскую длину волны будет иметь образовавшийся свободный электрон? Ответ: 1 нм.

3.15. Электрон обладает кинетической энергией 1,02 МэВ. Во сколько раз изменится его дебройлевская длина волны, если кинетическая энергия уменьшится вдвое? Ответ: 1,6 раза.

3.16. Электрон движется по окружности радиусом 1 см в однородном магнитном поле с индукцией 0,05 Тл. Какова дебройлевская длина волны этого электрона? Ответ: 8,3 пм.

3.17. Пучок параллельно движущихся электронов, имеющих скорости 106 м/с, падает нормально на диафрагму с длинной щелью шириной 1 мкм. На экране за щелью на расстоянии 0,5 м образуется дифракционная картина. Определить линейное расстояние между первыми двумя дифракционными минимумами. Ответ: 0,73 мм.

3.18.  $\alpha$ -частица, движущаяся по окружности радиусом 10 см в однородном магнитном поле, длину волны, равную 10 пм. Найти индукцию магнитного поля, в котором движется частица. Ответ: 2 мТл.

3.19. Найти дебройлевскую длину волны электрона, движущегося по круговой орбите в атоме водорода, находящегося в основном состоянии. Сравнить ее с длиной орбиты. Ответ:  $3,32 \cdot 10^{-10}$  м.

3.20. Во сколько раз изменяется дебройлевская длина волны электрона при переходе его в атоме водорода из основного энергетического состояния в первое возбужденное? Ответ: 2.

3.21. Сколько дебройлевских длин волн укладывается на длине орбиты электрона в атоме водорода: 1) В невозбужденном состоянии? 2) В первом возбужденном состоянии? 3) На пятой орбите?

3.22. Из теории Бора для атома водорода следует, что стационарными для электронов атома являются такие орбиты, на длине которых укладывается целое число длин дебройлевских волн. Исходя из этого, найдите числовые значения момента импульса электрона в атоме водорода на первых трех боровских орбитах. Ответ:  $1,05 \cdot 10^{-34}$ ;  $2,1 \cdot 10^{-34}$ ;  $3,16 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

3.23. Поток одинаково ускоренных электронов падает нормально на щель шириной 0,2 мкм. В дифракционной картине за щелью минимум

второго порядка наблюдается под углом  $2,9^0$ . Найти по этим данным разность потенциалов ускоряющего электрического поля. Ответ: 0,06 В.

3.24. Параллельный поток моноэнергетических электронов падает нормально на диафрагму с узкой прямоугольной шириной 1 мкм. Определить скорости этих электронов, если на экране, расположенном от щели на расстоянии 50 см, ширина центрального дифракционного максимума равна 0,36 мм. Ответ:  $2 \cdot 10^6$  м/с.

3.25. Известно, что движущиеся нерелятивистские протон и альфа-частица имеют одинаковые дебройлевские длины волн. Во сколько раз отличаются их кинетические энергии? Ответ: 4.

## 4. СООТНОШЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ

Соотношение неопределенностей для координаты и импульса:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar.$$

Соотношение неопределенностей для энергии и времени:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar.$$

4.1. Определить неточность в определении координаты электрона, движущегося в атоме водорода со скоростью 1,5 Мм/с, если допустить, что неточность в определении скорости составляет 10% от ее величины. Сравнить полученную неточность с размером атома и выяснить, применимо ли понятие «траектории» в данном случае. Ответ:  $7,7 \cdot 10^{-10}$  м.

4.2. Оценить с помощью соотношения неопределенностей неопределенность скорости электрона в атоме водорода, полагая, что размер атома равен 0,2 нм. Сравнить полученное значение со скоростью электрона на первой боровской орбите данного атома. Можно ли применять классическую механику для описания поведения электрона в атоме водорода? Ответ: 0,6 Мм/с.

4.3. При движении частицы вдоль оси  $x$  скорость ее может быть определена с точностью (ошибкой) до 1 см/с. Найти неопределенность координаты, если частицей является: 1) электрон, 2) дробинка массой 0,1 г. Ответ: 0,01 м;  $10^{-28}$  м.

4.4. Сравнить неопределенность в определении скорости  $\alpha$ -частицы (энергия 6 МэВ), если ее координата установлена с точностью до  $10^{-5}$  м, и шарика массой  $10^{-4}$  кг, если координата его центра тяжести определена с такой же точностью. Какую механику (классическую или квантовую) необходимо использовать в данном случае для описания поведения этих частиц? Ответ:  $1,6 \cdot 10^{-3}$  м/с,  $\sim 10^{-25}$  м/с, классическая.

4.5. Электрон с кинетической энергией 15 эВ находится в металлической пылинке диаметром 1 мкм. Оценить относительную неточность, с которой может быть определена скорость электрона. Ответ:  $5 \cdot 10^{-3}$  %.

4.6. Моноэнергетический поток электронов с энергией 10 эВ падает на щель шириной  $a$ . Можно считать, что когда электрон проходит через щель, его координата известна с неточностью  $\Delta x = a$ . Оценить получаемую при этом относительную неточность в определении импульса  $\Delta p/p$  электрона в двух случаях: 1)  $a = 100$  нм, 2)  $a = 0,1$  нм. В каком случае можно пользоваться классической механикой? Ответ:  $6,2 \cdot 10^{-4}$ ; 0,62.

4.7. Пылинки массой по  $10^{-12}$  г взвешены в воздухе и находятся в тепловом равновесии с ним. Можно ли установить, наблюдая за движением пылинок, отклонение от законов классической механики? Принять, что воздух находится при нормальных условиях, пылинки имеют сферическую форму, плотность вещества пылинок равна  $2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Ответ: нет.

4.8. Во сколько раз дебройлевская длина волны частицы меньше неопределенности  $\Delta x$  ее координаты, которая соответствует относительной неопределенности импульса в 1% ? Ответ:  $\sim 16$ .

4.9. Предполагая, что неопределенность координаты движущейся частицы равна дебройлевской длине волны, определить относительную неточность в определении импульса этой частицы. Ответ: 0,16.

4.10. Используя соотношение неопределенностей для координаты и импульса найти выражение, позволяющее оценить минимальную кинетическую энергию электрона, находящегося в одномерной бесконечно глубокой потенциальной яме шириной  $\ell$ . Ответ:  $\hbar^2/(2m\ell^2)$ .

4.11. Используя соотношение неопределенностей оценить низший энергетический уровень электрона в атоме водорода. Принять, что линейный размер атома  $\sim 0,1$  нм. Ответ:  $\sim 4$  эВ.

4.12. Показать, используя соотношение неопределенностей, что в ядре не могут находиться электроны. Линейные размеры ядра принять равными 5 фм.

4.13. Приняв, что минимальная энергия нуклона в ядре равна 10 МэВ, оценить, исходя из соотношения неопределенностей, линейные размеры ядра. Ответ: 1,4 фм.

4.14. Электронный пучок ускоряется в электронно-лучевой трубке напряжением 500 В. Принимая, что неопределенность импульса равна 0,1% электрона, найти неопределенность его координаты. Ответ:  $8,7 \cdot 10^{-9}$  м.

4.15. Ширина следа электрона, обладающего энергией 1,5 кэВ, на фотопластинке, полученного с помощью камеры Вильсона, составляет  $\Delta x = 1$  мкм. Можно ли по этому следу обнаружить отклонение в движении электрона от законов классической механики? Ответ:  $\Delta p/p = 5 \cdot 10^{-6}$ ; нет.

4.16. Электронный пучок ускоряется напряжением 1 кВ. Известно, что неопределенность скорости электронов составляет  $10^{-3}$  от ее числового значения. Найти неопределенность координаты электрона. Являются ли электроны в данных условиях классическими частицами? Ответ:  $6,2 \cdot 10^{-9}$  м.

4.17. Определить отношение неопределенностей скорости электрона, если его координата установлена с точностью до  $10^{-5}$  м, и пылинки массой  $10^{-12}$  кг, если ее координата установлена с той же точностью. Ответ:  $\sim 10^{18}$ .

4.18. Электронный пучок выходит из электронной пушки, ускоренный разностью потенциалов 200 В. Определить, можно ли одновременно измерить траекторию электрона с точностью до 100 пм (порядка диаметра атома) и его скорость с точностью 10% . Ответ: нет.

4.19. Электрон находится в одномерной прямоугольной потенциальной яме с очень высокими стенками. Ширина ямы  $\ell$ . Оценить с помо-

щью соотношения неопределенностей силу давления электрона на стенки ямы при минимально возможной его энергии. Ответ:  $F \sim \hbar^2/m\ell^3$ .

4.20. Используя соотношение неопределенностей для энергии и времени оценить ширину энергетического уровня в атоме водорода, находящегося: 1) в основном состоянии; 2) в возбужденном состоянии с временем жизни  $\sim 10^{-8}$  с. Ответ: 0,  $10^{-7}$  эВ.

4.21. Атом излучил фотон с длиной волны 0,58 мкм за время  $\sim 10^{-8}$  с. Оценить неопределенность  $\Delta x$ , с которой можно установить координату фотона в направлении его движения, и относительную неопределенность его длины волны. Ответ: 3 м;  $3 \cdot 10^{-8}$ .

4.22. Свободно движущаяся частица имеет относительную неопределенность кинетической энергии равную  $1,6 \cdot 10^{-4}$ . Оценить, во сколько раз неопределенность координаты такой частицы больше ее де-Бройлевской длины волны. Ответ: 2000.

4.23. Возбужденный атом испускает фотон в течение  $\sim 0,01$  мкс. Длина волны излучения 600 нм. Найти с помощью соотношений неопределенностей с какой относительной точностью может быть определена энергия фотона. Ответ:  $3,2 \cdot 10^{-6}$  %.

4.24. Определить с помощью соотношений неопределенностей степень монохроматичности  $\Delta\lambda/\lambda$  первой фиолетовой линии в спектре излучения водорода, если известно, что время перехода электрона с пятой орбиты на вторую  $\sim 10$  нс, а энергия излучаемого фотона равна 2,87 эВ. Ответ:  $2,3 \cdot 10^{-8}$ .

## 5. ЧАСТИЦА В БЕСКОНЕЧНО ГЛУБОКОЙ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЯМЕ

Уравнение Шредингера для частицы в бесконечно глубокой потенциальной яме:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2mE}{\hbar^2}\psi = 0$$

Волновая функция для частицы в бесконечно глубокой потенциальной яме:

$$\psi(x) = C_1 e^{ikx} + C_2 e^{-ikx}, \text{ или } \psi(x) = C \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{\ell} x\right).$$

Энергия частицы в бесконечно глубокой потенциальной яме:

$$E = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m\ell^2} n^2,$$

где:  $\psi$  - волновая функция частицы,  $x$  - координата,  $m$  - масса,  $E$  - кинетическая энергия частицы,  $C_1, C_2, C$  - амплитудные значения волновой функции,  $\ell$  - геометрическая ширина ямы,  $\hbar$  - постоянная Планка,  $k$  - волновое число,  $i = \sqrt{-1}$ ,  $n = 1, 2, 3$ ,

5.1. Собственная функция, описывающая состояние микрочастицы в бесконечно глубокой потенциальной яме шириной  $\ell$ , имеет вид  $\psi_n(x) = C \sin \frac{n\pi}{\ell} x$ . Используя условия нормировки, определить постоянную  $C$ . Ответ:  $C = \sqrt{\frac{2}{\ell}}$ .

5.2. Решение уравнения Шредингера для микрочастицы массой  $m$  в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме шириной  $l$  можно записать в виде:  $\psi_x = C_1 e^{ikx} + C_2 e^{-ikx}$ , где  $K = \sqrt{2mE}/\hbar$ . Используя граничные условия нормировки  $\psi$  - функции, определить: 1) коэффициенты  $C_1$  и  $C_2$ ; 2) собственные значения энергии  $E_n$ . Найти выражение для собственной нормированной  $\psi$  - функции. Ответ: 1)  $C_1 = -C_2 = 1/\sqrt{2l}$ ; 2)  $E_n = \pi^2 \hbar^2 n^2 / 2ml^2$  и  $\psi = i\sqrt{\frac{2}{l}} \sin\left(\frac{n\pi}{l} x\right)$ .

5.3. Изобразить на графике вид первых трёх собственных  $\psi$  - функций описывающих состояние электрона в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме шириной  $\ell$ , а также вид  $|\psi_n(x)|^2$ . Установить соответствие между числом  $N$  узлов волновой функции /т. е. числом точек, где волновая функция обращается в ноль в интервале  $0 < x < \ell$  и

квантовым числом  $n$ . Функцию считать нормированной на единицу. Ответ: Число узлов  $N$  растёт с увеличением квантового числа  $n$ :  $N = n - 1$ , т. е. на единицу меньше, чем квантовое число. С увеличением энергии число узлов возрастает.

5.4. Частица в бесконечно глубокой потенциальной яме шириной  $\ell$  находится в возбуждённом состоянии с  $n = 2$ . Определить, в каких точках интервала  $0 < x < \ell$  плотность вероятности  $|\psi_n(x)|^2$  нахождения частицы максимальна и минимальна. Ответ: максимальна при  $x_1 = \frac{l}{4}$  и

$$x_3 = \frac{3l}{4}; \text{ минимальна при } x_2 = \frac{l}{2}.$$

5.5. Электрон находится в бесконечно глубокой потенциальной яме шириной  $\ell$ . В каких точках в интервале  $0 < x < \ell$  плотность вероятности нахождения электрона на первом и втором энергетических уровнях одинакова? Вычислить плотность вероятности для этих точек. Решение пояснить графически. Ответ:  $x_1 = \ell/3$ ,  $x_2 = 2\ell/3$ ,  $|\psi(x)|^2 = 3/2l$ .

5.6. Частица находится в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме имея минимальную энергию. Какова вероятность обнаружения частицы в средней трети ямы? Ответ: 0,609.

5.7. Электрон движется в одномерной бесконечно глубокой потенциальной яме шириной 0,6 нм имея энергию 16,6 эВ. Какова вероятность обнаружения этого электрона в первой четверти ямы? Ответ: 0,25.

5.8. Электрон находится в сильно связанном состоянии и может двигаться только в одном координатном направлении в пределах отрезка 1,12 нм. Какую энергию необходимо сообщить электрону, чтобы он перешел из нормального энергетического состояния в первое возбужденное? Как при этом изменится вероятность обнаружения электрона в центре отрезка? На второй вопрос задачи дать качественный ответ, обосновав его графически. Ответ: 0,9 эВ.

5.9. В бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме шириной  $\ell = 792$  пм находится электрон в первом возбужденном состоянии. Электрону дополнительно сообщили энергию 7,2 эВ. Как в результате этого изменится плотность вероятности обнаружения электрона в точке  $x = \ell/4$  потенциальной ямы? Ответ: от  $2,5 \cdot 10^{41}/\text{м}$  до 0.



5.10. Микрочастица в бесконечно глубокой потенциальной яме находится в основном энергетическом состоянии. Какова вероятность обнаружения частицы в крайней трети ямы? Ответ: 0,195.

5.11. В одномерной бесконечно глубокой потенциальной яме шириной  $\ell$  находится электрон в невозбужденном энергетическом состоянии. Вычислить вероятность обнаружения электрона в интервале шириной  $\ell/4$ , равноудалённом от стенок ямы. Ответ: 0,475.

5.12. Электрон в одномерной прямоугольной потенциальной яме шириной  $\ell = 1$  нм с бесконечно высокими стенками находится в возбуждённом состоянии с  $n = 4$ . Определить: 1) энергию электрона; 2) вероятность обнаружения электрона в первой четверти ямы. Пояснить физический смысл полученного результата, изобразив графически плотность вероятности обнаружения частицы в данном состоянии. Ответ: 1)  $E = 2,4 \cdot 10^{-17}$  Дж; 2) 0,25.

5.13. Волновая функция  $\psi(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right)$  описывает основное энергетическое состояние частицы в бесконечно глубокой прямоугольной яме шириной  $\ell$ . Вычислить вероятность обнаружения частицы в малом интервале  $\Delta\ell = 0,01\ell$  вблизи стенки ямы. Ответ:  $6,6 \cdot 10^{-6}$ .

5.14. Волновая функция  $\psi(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right)$  описывает основное состояние частицы в бесконечно глубокой прямоугольной потенциальной яме шириной  $\ell$ . Вычислить вероятность нахождения частицы в малом интервале  $\Delta\ell = 0,01\ell$  в средней части ямы  $\left(\frac{l}{2} - \frac{\Delta l}{2}\right) \leq x \leq \left(\frac{l}{2} + \frac{\Delta l}{2}\right)$ . Ответ: 0,02.

5.15. Частица в одномерной потенциальной яме шириной  $\ell$  с бесконечно высокими вертикальными стенками находится в первом возбуждённом состоянии. Определить вероятность обнаружения частицы в области  $\frac{3}{8}l \leq x \leq \frac{5}{8}l$ . Пояснить решение графически. Ответ: 0,091.

5.16. В прямоугольной потенциальной яме шириной  $\ell$  с абсолютно непроницаемыми стенками  $0 < x < \ell$  находится частица в основном энергетическом состоянии. Какова вероятность нахождения этой частицы в области  $\frac{l}{4} \leq x \leq \frac{3}{4}l$ . Поясните физический смысл полученного результата, изобразив графически плотность вероятности обнаружения частицы в данном состоянии. Ответ: 0,818.

5.17. Вычислить отношение вероятностей нахождения электрона на первом и втором энергетических уровнях в интервале  $\Delta x = \frac{l}{4}$ , равноудаленных от стенок одномерной потенциальной "ямы" шириной  $l$ . Поясните смысл полученного результата графически. Ответ: 5,22.

5.18. Микрочастица находится в одномерной бесконечно глубокой потенциальной яме шириной  $l$ , имея минимальную энергию. Во сколько раз отличаются вероятности обнаружения частицы на отрезке шириной  $l/4$ , если этот отрезок лежит: 1. В середине ямы, 2. На краю ямы? Поясните смысл полученного результата графически. Ответ:

5.19. Электрон находится в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме. Во сколько раз различаются вероятности обнаружения электрона в средней части ямы на отрезке  $\Delta x = l/4$ , равноудаленном от стенок ямы: 1) в его основном энергетическом состоянии; 2) в возбужденном состоянии с  $n=2$ . Ответ: 5,22.

5.20. Электрон находится в одномерной прямоугольной потенциальной яме шириной  $l$  с бесконечно высокими стенками. Какова вероятность обнаружения электрона в средней трети ямы, если электрон находится во втором возбужденном состоянии? Поясните физический смысл полученного результата, изобразив графически плотность вероятности обнаружения электрона в данном состоянии. Ответ: 0,33.

5.21. Частица в одномерной прямоугольной потенциальной яме шириной  $l$  с бесконечно высокими стенками находится в возбужденном состоянии с  $n = 3$ . Определите, в каких точках ямы плотность вероятности обнаружения частицы: 1) максимальна, 2) минимальна. Поясните полученный результат графически. Указание: запишите формулу вероятности нахождения частицы и решите задачу на экстремум. ?КАК

Ответ: 1) максимальна при  $x = l/6, l/2, 5l/6$ ; 2) минимальна при  $x = l/3, 2l/3$

5.22. Микрочастица с массой  $m=10\text{-}30\text{кг}$  находится в одномерной потенциальной яме шириной  $l=1\text{нм}$  и имеет энергию 3,08 эВ. Считая, что энергия частицы много меньше «глубины» ямы, найти графически вероятность ее обнаружения на отрезке от  $x_1 = l/3$  до  $x_2 = l/2$ . Ответ: 0,17.

5.23. Вычислите отношение вероятностей  $\omega_3 / \omega_2$  обнаружения электрона на отрезке  $\frac{1}{4}l \leq x \leq \frac{1}{2}l$  в одномерной потенциальной яме шириной  $l$  с бесконечно высокими стенками, когда он находится в энергетических состояниях с  $n=3$  и  $n=2$ . Ответ: 1,21.

5.24. Микрочастица находится в одномерной прямоугольной потенциальной яме шириной  $l$  с бесконечно высокими стенками. Вычислите от-

ношение вероятностей  $\omega_5/\omega_3$  нахождения частицы на отрезке  $l/3 \leq x \leq l/2$  на третьем ( $n=3$ ) и пятом ( $n=5$ ) энергетических уровнях. Ответ: 1,14.

5.25. В одномерной прямоугольной потенциальной яме шириной  $\ell$  с бесконечно высокими стенками находится микрочастица. На сколько отличаются вероятности обнаружения частицы  $\omega_4 - \omega_3$  на отрезке  $l/3 \leq x \leq l/2$ , если частица находится: 1) на четвертом энергетическом уровне; 2) на третьем энергетическом уровне? Ответ: 0,034.

5.26. В бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме находится микрочастица. Ширина ямы равна  $\ell$ . Вычислите отношение вероятностей  $\omega_4/\omega_5$  обнаружения частицы на интервале  $l/3 \leq x \leq l/2$  при энергиях, соответствующих четвертому и пятому энергетическим уровням. Ответ: 1,06.