

## 22 АТОМ ВОДНЮ. РЕНТГЕНІВСЬКІ СПЕКТРИ

### ЗВЕДЕННЯ ОСНОВНИХ ФОРМУЛ

#### 22.1 Момент імпульсу електрона на стаціонарних орбітах атома Бора

$$L = mvr = n\hbar \quad (n = 1, 2, 3, \dots),$$

де  $m$  – маса електрона;  $r$  - радіус орбіти;  $v$  - швидкість електрона на орбіті;  $n$  - головне квантове число;  $\hbar$  - стала Планка.

**22.2 Енергія фотона, що випромінює атом водню при переході з одного стаціонарного стану, з квантовим числом  $m$  в інший стан  $n$  :**

$$E = 2\pi\hbar\omega = E_m - E_n,$$

де  $\omega$  - циклічна частота випромінювання;  $E_m$  і  $E_n$  – енергії атома у стаціонарних станах з квантовими числами  $m$  і  $n$  відповідно.

#### 22.3 Енергія електрона, що перебуває на $n$ -й орбіті:

$$E_n = -\frac{me^4}{32\pi^2\varepsilon_0^2\hbar^2n^2}.$$

$\varepsilon_0$  - діелектрична стала.

**22.4 Серіальна формула** (узагальнена формула Бальмера) визначає довжину хвилі світла, що випромінюється або поглинається воднеподібним атомом при переході електрона з однієї орбіти на іншу:

$$\frac{1}{\lambda} = Z^2 R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right),$$

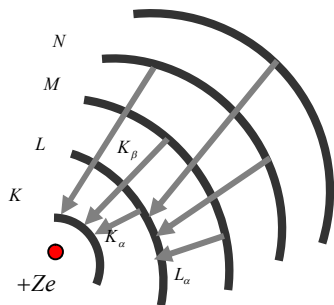
де  $R$  – стала Рідберга ( $R=1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ );  $Z$  - заряд ядра у відносних одиницях ( $Z=1$  для водню).

### 22.5 Короткохвильова межа $\lambda_K$ безперервного рентгеновського спектра

$$\lambda_K = \frac{hc}{eU},$$

де  $e$  - заряд електрона;  $U$  - різниця потенціалів, прикладена до рентгеновської трубки;  $h$  - стала Планка.

### 22.6 Закон Мозлі у загальному випадку



$$\sqrt{\omega} = C(Z - \sigma),$$

де  $\omega$  - частота ліній рентгеновського спектра;  $Z$  - атомний номер елемента, що випромінює цей спектр;  $\sigma$  - стала екранування;  $C$ - стала.

Враховуючи, що стала  $C$  дорівнює  $C = \sqrt{R' \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)}$ , **закон Мозлі** у загальному випадку набуде вигляду

$$\omega = R'(Z - \sigma)^2 \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right),$$

де  $R'$  - стала Рідберга ( $R' = 2,07 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}$ );  $n = 1, 2, 3, \dots$ ;  $m = n+1, n+2, \dots$  - головні квантові числа.

Тоді:

а) для ліній  $K_\alpha$

$$\omega_{K_\alpha} = R(Z-1)^2 \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right);$$

б) для ліній  $K_\beta$

$$\omega_{K_\beta} = R(Z-1)^2 \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{3^2} \right);$$

в) для ліній  $L_\alpha$

$$\omega_{L_\alpha} = R(Z-7,5)^2 \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right).$$

**22.7 Енергія фотона  $K_\alpha$  - лінії рентгенівського випромінювання:**

$$W_{K_\alpha} = \frac{3}{4} W_i (Z-1)^2,$$

де  $W_i$  – енергія іонізації атома водню.

## ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

**Приклад 22.1** Визначити енергію електрона, що перебуває на другій орбіті атома водню.

### Розв'язання

$$\frac{W_n - ?}{n = 2.}$$

Згідно з теорією Бора радіус  $r$  електронної орбіти і швидкість  $v$  електрона на ній пов'язані співвідношенням

$$mvr = n\hbar, \quad (1)$$

де  $e$  і  $m$  – заряд і маса електрона;  $n$  - головне квантове число ( $n=1, 2, 3, \dots$ );  $\hbar$  - стала Планка - Дірака..

У цей вираз входять дві невідомі величини  $r$  і  $v$ . За друге рівняння використаємо рівняння руху електрона. Згідно з теорією Бора електрон обертається навколо ядра. При цьому сила взаємодії між електричним зарядом ядра і електроном надає електрону доцентрового прискорення. З використанням другого закону Ньютона можна записати

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}, \quad (2)$$

звідки

$$mv^2 r = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}. \quad (3)$$

Розділимо (3) на (2) та отримаємо

$$v = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 n\hbar}. \quad (4)$$

Тоді радіус  $n$ -ї орбіти електрона

$$r = 4\pi\epsilon_0 \frac{\hbar^2 n^2}{me^2}. \quad (5)$$

Енергія атома складається з кінетичної енергії електрона та енергії взаємодії електрона з ядром:

$$W = \frac{mv^2}{2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}. \quad (6)$$

З використанням співвідношень (4) та (5) одержимо для енергії електрона на  $n$ -му рівні

$$W_n = \frac{1}{2} \frac{me^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 n^2 \hbar^2} - \frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \frac{me^4}{\hbar^2 n^2} = \frac{1}{2} \frac{me^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 n^2 \hbar^2}.$$

Після підставлення числових значень фізичних величин знайдемо:

$$\begin{aligned} W_n &= - \left( \frac{1}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \right)^2 \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^4}{2 \cdot (1,05 \cdot 10^{-34})^2} \frac{1}{2^2} \\ &= 5,47 \cdot 10^{-19} \text{ (Дж)} = 3,42 \text{ (eВ)}. \end{aligned}$$

Проведемо перевірку одиниць одержаної величини:

$$\begin{aligned}
 [W] &= \frac{1}{[\varepsilon_0]^2} \frac{[m][e]^4}{[\hbar]^2} = \frac{кг \cdot Кл^4}{(\Phi/м)^2 (Дж \cdot с)^2} = \frac{Кл^4 \cdot кг \cdot м^2}{\Phi^2 \cdot Дж^2 \cdot с^2} = \frac{\Phi^4 \cdot В^4 \cdot Н \cdot м}{\Phi^2 \cdot Дж^2} \\
 &= \frac{\Phi^2 \cdot В^4}{Дж} = \frac{Кл^2 В^4}{В^2 Дж} = \frac{Кл^2 В^2}{Дж} = \frac{Дж^2}{Дж} = Дж.
 \end{aligned}$$

**Відповідь:**  $W_n = -5,47 \cdot 10^{-19} Дж \quad -3,42 eV$ .

**Приклад 22.2** Розрахувати, користуючись теорією Бора, період обертання електрона у атомі водня, який є у збудженому стані, з головним квантовим числом  $n=2$ .

### Розв'язання

$T - ?$ <hr style="border: 0; border-top: 1px solid black; margin: 5px 0;"/> $n = 2.$	Згідно з теорією Бора радіус $r$ електронної орбіти і швидкість $v$ електрона на ній пов'язані співвідношенням
------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------

$$mvr = n\hbar, \quad (1)$$

де  $e$  і  $m$  – заряд і маса електрона;  $n$  - головне квантове число ( $n=1, 2, 3, \dots$ );  $\hbar$  - стала Планка - Дірака.

У цей вираз входять дві невідомі величини  $r$  і  $v$ .

З використанням другого закону Ньютона можна записати:

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{e^2}{r^2}, \quad (2)$$

звідки

$$mv^2 r = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}. \quad (3)$$

Розділимо (3) на (2) та отримаємо, що швидкість електрона на  $n$ -ій орбіті дорівнює:

$$v = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 n\hbar}. \quad (4)$$

Тоді радіус  $n$ -ї орбіти електрона

$$r = 4\pi\epsilon_0 \frac{\hbar^2 n^2}{me^2}. \quad (5)$$

Період обертання електрона по орбіті визначається співвідношенням

$$T = \frac{2\pi r}{v}. \quad (6)$$

Підставивши у вираз (6) значення  $v$  та  $r$  із співвідношень (4) та (5), отримаємо

$$T = \frac{2\pi 4\pi\epsilon_0 \hbar^2 n^2}{me^2 \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar n}} = \frac{32\pi^3 \epsilon_0^2 \hbar^3 n^3}{me^4}. \quad (7)$$

Після підставлення числових значень фізичних величин у співвідношення (7) отримаємо

$$T = \frac{32 \cdot (3,14)^3 \cdot (8,85 \cdot 10^{-12})^2 \cdot (1,05 \cdot 10^{-34})^3 \cdot 2^3}{9,1 \cdot 10^{-31} (1,6 \cdot 10^{-19})^4} = 12,1 \cdot 10^{-16} \text{ (с)}.$$

Проведемо перевірку одиниць одержаної величини:

$$\begin{aligned}
 [T] &= \frac{[\varepsilon_0]^2 [\hbar]^3}{[m][e]^4} = \frac{(\Phi/m)^2 (\text{Дж} \cdot \text{с})^3}{\text{кг} \cdot \text{Кл}^4} = \frac{\Phi^2 \cdot \text{Дж}^3 \text{с}^3}{\text{Кл}^4 \text{кг} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{Кл}^2 \text{Дж}^3 \text{с}}{\text{В}^2 \text{Кл}^4 \text{Н} \cdot \text{м}} = \\
 &= \frac{\text{Дж}^2 \cdot \text{с}}{\text{В}^2 \text{Кл}^2} = \frac{\text{Дж}^2 \cdot \text{с}}{\text{Дж}^2} = \text{с}.
 \end{aligned}$$

**Відповідь:**  $T = 1,21 \cdot 10^{-17} \text{ с}$ .

**Приклад 22.3** Електрон у збудженому атомі гелію перейшов з п'ятого енергетичного рівня на другий. Визначити енергію фотона, що при цьому випромінюється.

### Розв'язання

Для визначення енергії фотона скористаємося серіальною формулою для воднеподібних іонів:

$W - ?$
$n=2,$
$m=5.$

$$\frac{1}{\lambda} = Z^2 R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (1)$$

де  $\lambda$  - довжина хвилі фотона;  $R$  - стала Рідберга;  $z$  - заряд ядра у відносних одиницях (при  $Z = 1$  формула набирає вигляду, що є характерним для водню);  $n$  - номер орбіти, на яку перейшов електрон;  $m$  - номер орбіти, з якої перейшов електрон ( $n$  і  $m$  - головні квантові числа).

Енергія фотона  $W$  визначається співвідношенням

$$W = \frac{hc}{\lambda}.$$

Тому, помноживши обидві частини рівняння (1) на  $hc$ , одержимо вираз для енергії фотона у вигляді



$$W = Z^2 hcR \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right).$$

Оскільки всі величини у співвідношенні відомі, проведемо розрахунок  $W$  :

$$\begin{aligned} W &= 1,1 \cdot 10^7 \cdot 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 2^2 \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{5^2} \right) = \\ &= 1,83 \cdot 10^{-18} \text{ (Дж)} = 11,48 \text{ (eV)}. \end{aligned}$$

Проведемо перевірку одиниць одержаної величини:

$$[W] = [R][h][c] \quad \text{м}^{-1} \cdot \text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{м/с} = \text{Дж}.$$

**Відповідь:**  $W = 1,83 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = 11,48 \text{ eV}.$

**Приклад 22.4** Фотон вибиває з атома водню, який перебуває в основному стані, електрон з кінетичною енергією  $W_K = 10 \text{ eV}$ . Визначити енергію  $W$  цього фотона.

$W - ?$
$W_K = 10 \text{ eV}.$

**Розв’язання**

Енергія фотона витрачається на іонізацію атома водню і надання електрону кінетичної енергії:

$$W = W_K + W_i. \tag{1}$$

Енергія іонізації атома водню дорівнює

$$W_i = h\nu = h \frac{c}{\lambda}, \quad (2)$$

де  $\lambda$  знайдемо, застосувавши серіальну формулу та врахувавши, що відбувається перехід електрону між основним станом  $n=1$  і рівнем вакууму  $m = \infty$ :

$$\frac{1}{\lambda} = RZ^2 \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (3)$$

де  $R$  - стала Рідберга;  $Z$  - заряд ядра атома водню;  $n$  і  $m$  - головні квантові числа.

Підставивши співвідношення (3) у (4), отримаємо

$$W_i = hcRZ^2 \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right). \quad (4)$$

Тепер з виразів (1) (4) знайдемо енергію фотона:

$$W = W_K + hcRZ^2 \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right).$$

Після підставлення числових значень фізичних величин отримаємо

$$W = 10 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} + 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 1,1 \cdot 10^7 \cdot 1^2 \cdot \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{\infty^2} \right) = 2,35 (\text{Дж}).$$

Проведемо перевірку одиниць одержаної величини:

$$[W] = [W_k] + [R][h][c] \quad \text{Дж} + \text{м}^{-1} \cdot \text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{м/с} = \text{Дж}.$$

**Відповідь:**  $W = 2,35 \text{ Дж}.$

**Приклад 22.5** Визначити довжину хвилі  $\lambda_{K\alpha}$  і енергію  $W_{K\alpha}$  фотона  $K_\alpha$  - лінії рентгенівського спектра, що випромінюється ренієм при бомбардуванні його швидкими електронами.

### Розв'язання

$\lambda_{K\alpha} - ?$

$W_{K\alpha} - ?$

$z=75.$

При бомбардуванні ренію швидкими електронами виникає рентгенівське випромінювання, що має лінійчатий спектр. Ці електрони проникають всередину електронної оболонки атома та вибивають електрони, що належать до глибинних електронних оболонок. Найближча до ядра електронна оболонка ( $K$ -оболонка) має два електрони. Якщо один із цих електронів виявляється вибитим за межі атома, то на вільне місце переходить електрон з оболонки, що міститься вище (L, M, N). При цьому виникає відповідна лінія  $K$ -серії. При переході електрона з L-оболонки на K-оболонку випромінюється найінтенсивніша  $K_\alpha$  лінія рентгенівського спектра.

Довжина хвилі цієї лінії визначається за законом Мозлі для ліній  $K_\alpha$  :

$$\omega_{K_\alpha} = R'(Z-1)^2 \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) = \frac{3}{4} R'(Z-1)^2.$$

Враховуючи, що  $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$ , отримаємо

$$\frac{1}{\lambda_{K_\alpha}} = \frac{3}{4} R(z-1)^2.$$

З цього співвідношення довжина хвилі дорівнює

$$\lambda_{K_\alpha} = \frac{4}{3R(z-1)^2}.$$

Після підставлення значень фізичних величин у останнє співвідношення одержимо відповідь

$$\lambda_{K_\alpha} = \frac{4}{3 \cdot 1,1 \cdot 10^7 (75-1)^2} = 2,2 \cdot 10^{-11} \text{ (м)}.$$

Знаючи довжину хвилі, визначимо енергію фотона за формулою

$$W_{K_\alpha} = \frac{hc}{\lambda}.$$

Після підставлення числових значень величин знайдемо:

$$W_{K_{\alpha}} = \frac{2,3,14 \cdot 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{2,2 \cdot 10^{-11}} = 5,64 \cdot 10^{-14} \text{ (Дж)}.$$

Проведемо перевірку одиниць одержаної величини:

$$[W] = \frac{[\hbar][c]}{[\lambda]} \cdot \frac{\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{м/с}}{\text{м}} = \text{Дж}.$$

**Відповідь:**  $\lambda_{K_{\alpha}} = 2,2 \cdot 10^{-11} \text{ м}$ ;  $W_{K_{\alpha}} = 5,64 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}$ .

## ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО РОЗВ'ЯЗАННЯ

**22.1** Знайти: а) радіус першої борівської електронної орбіти для іонізованого атома гелію; б) швидкість електрона на ній.

**Відповідь:** а)  $r_1 = 26,6 \text{ нм}$ ; б)  $v_1 = 2,18 \text{ Мм/с}$ .

**22.2** Знайти: а) період обертання електрона на першій борівській орбіті в атомі водню; б) його кутову швидкість.

**Відповідь:** а)  $T_{об} = 1,43 \cdot 10^{-16} \text{ с}$ ; б)  $\omega = 4,4 \cdot 10^{16} \text{ рад/с}$ .

**22.3** Визначити для першої і другої орбіт атома водню значення сили кулонівського притягання і напруженість електричного поля.

**Відповідь:**  $F_1 = 82,4 \text{ нН}$ ;  $E_1 = 515 \text{ ГВ/м}$ ;

$$F_2 = 5,14 \text{ нН}; E_2 = 32,1 \text{ ГВ/м}.$$

**22.4** Довести, що для атома водню на борівських стаціонарних орбітах уміщується ціле число довжин хвиль де Бройля. Визначити довжини хвиль на першій і третій орбітах.

**Відповідь:**  $2\pi r_n = n\lambda$ ;  $\lambda_1 = 332 \text{ нм}$ ;  $\lambda_3 = 996 \text{ нм}$ .

**22.5** Скориставшись теорією Бора, визначити для електрона, що перебуває на першій і другій орбітах в атомі водню, відношення повних енергій.

**Відповідь:**  $\frac{W_2}{W_1} = 84$ .

**22.6** Визначити потенціальну  $W_{п}$ , кінетичну  $W_{к}$  і повну  $W$  енергію електрона, який перебуває на першій орбіті атома водню.

**Відповідь:**  $W_{п} = -27,2 \text{ eВ}$ ;  $W_{к} = 13,6 \text{ eВ}$ ;  $W = -13,6 \text{ eВ}$ .

**22.7** Скориставшись теорією Бора, визначити для електрона, що перебуває на першій і другій орбітах в атомі водню, відношення магнітного моменту електрона до механічного.

**Відповідь:**  $\frac{P_m}{L} = 8,79 \cdot 10^{10} \text{ Кл/кг}$ .

**22.8** Обчислити індукцію магнітного поля в центрі атома водню, обумовленого рухом електрона по першій борівській орбіті.

**Відповідь:**  $B = 12,5 \text{ Тл}$ .

**22.9** У скільки разів збільшиться радіус орбіти електрона в атомі водню, що перебуває в основному стані, при збудженні його квантом з енергією  $W = 12,09 \text{ eВ}$ ?

**Відповідь:**  $r_n / r_1 = 9$ .

**22.10** Атом водню переведений з нормального стану в збуджений з головним квантовим числом  $n = 2$ . Знайти енергію збудження атома.

**Відповідь:**  $W = 10,2 \text{ eВ}$ .

**22.11** Перехід електрона в атомі водню з  $n$ -ї на  $k$ -ту орбіту ( $k = 1$ ) супроводжується випромінюванням фотона з довжиною хвилі  $\lambda = 102,6 \text{ нм}$ . Знайти радіус  $n$ -ї орбіти.

**Відповідь:**  $r = 475 \text{ нм}$ .

**22.12** Знайти найменшу і найбільшу довжини хвиль спектральних ліній водню у видимій області спектра.

**Відповідь:**  $\lambda_{\max} = 656 \text{ нм}$ ;  $\lambda_{\min} = 410 \text{ нм}$ .

**22.13** Визначити перший потенціал  $U_1$  збудження атома водню.

**Відповідь:**  $U_1 = 10,2 \text{ В}$ .

**22.14** Підрахувати довжину хвилі  $\lambda$ , яку випромінює іон гелію  $\text{He}^+$  при переході з другого енергетичного рівня на перший. Зробити такий самий підрахунок для іона літію  $\text{Li}^{++}$ .

**Відповідь:**  $\lambda_1 = 30,3 \text{ нм}$ ;  $\lambda_2 = 13,5 \text{ нм}$ .

**22.15** Яку роботу необхідно виконати, щоб видалити електрон з другої орбіти атома водню за межі притягання його ядром?

**Відповідь:**  $A = 0,545 \text{ аДж}$ .

**22.16** Атомарний водень, збуджений світлом певної довжини хвилі, при переході в основний стан випромінює тільки три спектральних лінії. Визначити довжини хвиль цих ліній і зазначити, до яких серій вони належать.

**Відповідь:**  $\lambda_1 = 122 \text{ нм}$  – серія Лаймана;  $\lambda_2 = 103 \text{ нм}$  – серія Лаймана;  $\lambda_3 = 656 \text{ нм}$  – серія Бальмера.

**22.17** Визначити короткохвильову межу  $\lambda_{min}$  суцільного спектра рентгенівського випромінювання, якщо рентгенівська трубка працює під напругою  $U = 30$  кВ.

**Відповідь:**  $\lambda_{min} = 41$  нм.

**22.18** Збільшення напруги на рентгенівській трубці вдвічі зменшує короткохвильову межу суцільного спектра на  $\Delta\lambda = 0,025$  нм. Визначити початкове значення напруги  $U_1$ .

**Відповідь:**  $U_1 = 25$  кВ.

**22.19** Розрахувати довжину хвилі  $\lambda$  і енергію  $W$  фотона, який належить  $K_\alpha$  - лінії в спектрі характеристичного рентгенівського випромінювання платини.

**Відповідь:**  $\lambda = 20,5$  нм;  $W = 60,5$  кеВ.

**22.20** При якій найменшій напрузі  $U_{min}$  на рентгенівській трубці починають з'являтися лінії серії  $K_\alpha$  для міді?

**Відповідь:**  $U_{min} = 8$  кВ.

**22.21** Довжина хвилі  $\gamma$  - випромінювання радіо дорівнює  $\lambda = 0,0016$  нм. Яку різницю потенціалів треба прикласти до рентгенівської трубки, щоб одержати рентгенівські промені з цією довжиною хвилі?

**Відповідь:**  $U_{min} = 770$  кВ.

**22.22** При дослідженні лінійчастого рентгенівського спектра деякого елемента виявилось, що довжина хвилі лінії  $K_\alpha$  дорівнює  $\lambda = 76$  нм. Що це за елемент?

**Відповідь:**  $Z = 41$ ; ніобій.

**22.23** Антикатод рентгенівської трубки бомбардується електронами, швидкість яких  $v = 100$  Мм/с. Визначити максимальну частоту випромінювання в суцільному рентгенівському спектрі з урахуванням залежності маси електрона від швидкості його руху.

**Відповідь:**  $\nu = 9,22 \cdot 10^{18}$  Гц.



**22.24** Найменша довжина хвилі рентгенівських променів, отриманих від трубки, що працює при напрузі  $U = 40 \text{ кВ}$ , дорівнює  $\lambda = 31 \text{ нм}$ . Обчислити за цими даними сталу Планка.

**Відповідь:**  $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ .

**22.25** Визначити довжину хвилі найдовшої лінії К-серії характеристичного рентгенівського спектра, якщо анод рентгенівської трубки виготовлений із платини. Стала екранування дорівнює одиниці.

**Відповідь:**  $\lambda = 20,4 \text{ нм}$ .