

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

А.С. Опанасюк

**ЗБІРНИК ЗАДАЧ
ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ З ДИСЦИПЛІНИ
«ЗАГАЛЬНА ФІЗИКА»**

*для викладачів та студентів інженерного факультету
денної та заочної форм навчання*

**Частина 2 Електрика та магнетизм. Оптика. Квантова
оптика**

**Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету.
Протокол №4 від 10.10.2001 р.**

СУМИ ВИД-ВО СУМ ДУ 2002

I-МОДУЛЬ

1 ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ У ВАКУУМІ

Зведення основних формул розділу

1 Закон Кулона

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{\epsilon r^2},$$

де F – сила взаємодії двох точкових зарядів Q_1 та Q_2 ;
 r - відстань між зарядами; ϵ - діелектрична проникність середовища; ϵ_0 - електрична стала,

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \text{Ф/м} = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{Ф/м}.$$

2 Закон збереження заряду

$$\sum_{i=1}^n Q_i = \text{const},$$

де $\sum_{i=1}^n Q_i$ – алгебраїчна сума зарядів, що входять до ізольованої системи; n - кількість зарядів.

3 Напруженість електричного поля

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q},$$

де \vec{F} – сила, що діє на точковий заряд Q , який був поміщений в дану точку поля.

Сила, що діє на точковий заряд Q , розміщений в електричному полі дорівнює

$$\vec{F} = Q\vec{E}.$$

4 Потік вектора напруженості \vec{E} електричного поля:
а) через довільну поверхню S , яка поміщена в неоднорідне поле,

$$\Phi_E = \int_S E \cos \alpha \, dS, \text{ або } \Phi_E = \int_S E_n \, dS,$$

де α – кут між вектором напруженості \vec{E} і нормаллю \vec{n} до елемента поверхні; dS – площа елемента поверхні; E_n – проекція вектора напруженості на нормаль;

б) через плоску поверхню, яка поміщена в однорідне електричне поле,

$$\Phi_E = E \cdot S \cos \alpha.$$

Потік вектора напруженості \vec{E} через замкнену поверхню S

$$\Phi_E = \oint_S E_n \, dS,$$

де інтегрування ведеться вздовж поверхні.

5 Теорема Гаусса в інтегральній формі. Потік вектора напруженості електричного поля \vec{E} через будь-яку замкнену поверхню дорівнює алгебраїчній сумі зарядів, що містяться в середині цієї поверхні, поділений на ϵ_0 .

$$\Phi_E = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^n Q_i,$$

де $\sum_{i=1}^n Q_i$ – алгебраїчна сума зарядів, що містяться в середині

замкненої поверхні; n – кількість зарядів.

Теорема Гаусса у диференціальній формі

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{1}{\varepsilon_0} \rho,$$

де $\rho = \frac{dQ}{dV}$ - об'ємна густина заряду, що містяться в середині замкненої поверхні; Q, V - відповідно заряд та об'єм цієї області.

6 Напруженість електричного поля, що створює точковий заряд Q на відстані r від заряду,

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{Q}{r^2}.$$

7 Напруженість електричного поля, що створює металева сфера радіуса R , яка несе заряд Q , на відстані r від центра сфери:

- в середині сфери ($r < R$) $E = 0,$
- на поверхні сфери ($r = R$) $E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{Q}{R^2},$
- поза сферою ($r > R$) $E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{Q}{r^2}.$

8 Принцип суперпозиції (накладання) електричних полів, згідно з яким напруженість \vec{E} результуючого поля, створеного двома (і більше) точковими зарядами, дорівнює векторній (геометричній) сумі напруженостей полів, що додаються:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n.$$

У випадку двох електричних полів з напруженостями \vec{E}_1 і \vec{E}_2 абсолютне значення вектора напруженості дорівнює

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos \alpha},$$

де α - кут між векторами \vec{E}_1 і \vec{E}_2 .

9 Напруженість поля, що створюється нескінченно довгою рівномірно зарядженою ниткою (або циліндром) на відстані r від її осі,

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2\tau}{\epsilon r},$$

де τ – лінійна густина заряду.

Лінійна густина заряду є величина, яка дорівнює відношенню заряду, який розподілений вздовж нитки, до довжини нитки (циліндра):

$$\tau = dQ/dl.$$

10 Напруженість поля, що створює нескінченна рівномірно заряджена площина,

$$E = \frac{1}{2} \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon},$$

де σ – поверхнева густина заряду.

Поверхнева густина заряду є величиною, яка дорівнює відношенню заряду, розподіленого вздовж поверхні, до площі цієї поверхні:

$$\sigma = dQ/dS.$$

11 Напруженість поля, що створюється двома паралельними нескінченними рівномірно і різнойменно зарядженими площинами, з однаковою за абсолютним значенням поверхневою густиною σ заряду (поле плоского конденсатора)

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon}.$$

Наведена формула справедлива для обчислення напруженості поля між пластинами плоского конденсатора (в середній його

частині) лише в тому випадку, якщо відстань між пластинами значно менша лінійних розмірів пластин конденсатора.

12 Циркуляція вектора напруженості електричного поля є величина, яка кількісно дорівнює роботі з переміщення одиничного точкового позитивного заряду вздовж замкненого контуру. Циркуляція виражається інтегралом за замкненим контуром $\oint E_l dl$, де E_l – проекція вектора напруженості \vec{E} в даній точці контуру на напрямок дотичної до контуру в тій самій точці.

У випадку електростатичного поля циркуляція вектора напруженості дорівнює нулю:

$$\oint E_l dl = 0.$$

13 Потенціал електричного поля є величина, що дорівнює відношенню потенціальної енергії до заряду, який поміщений у дану точку поля,

$$\varphi = \Pi/Q,$$

або потенціал електричного поля є величина, яка дорівнює відношенню роботи сил поля з переміщення точкового позитивного заряду із даної точки поля у нескінченність до величини цього заряду:

$$\varphi = A/Q.$$

14 Потенціал електричного поля у нескінченності умовно взятий за нуль. При переміщенні заряду в електричному полі робота $A_{z.c}$ зовнішніх сил дорівнює за абсолютним значенням роботі $A_{c.n}$ сил поля і протилежна їй за знаком:

$$A_{z.c} = -A_{c.n}.$$

15 Потенціал електричного поля, що створюється точковим зарядом Q на відстані r від заряду,

$$\varphi = -\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r}.$$

16 Потенціал електричного поля, що створює металева сфера радіуса R , яка несе заряд Q , на відстані r від центра сфери:

- в середині сфери ($r < R$)
$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon R};$$

- на поверхні сфери ($r = R$)
$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon R};$$

- поза сферою ($r > R$)
$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r}.$$

17 Потенціал електричного поля, що створено системою n точкових зарядів, в даній точці за принципом суперпозиції електричних полів дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$, які створюються окремими точковими зарядами Q_1, Q_2, \dots, Q_n :

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i.$$

18 Енергія W взаємодії системи точкових зарядів Q_1, Q_2, \dots, Q_n визначається роботою, яку ця система зарядів може здійснити за умови віддалення їх відносно один одного у нескінченність, і виражається формулою

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n Q_i \varphi_i,$$

де φ_i – потенціал поля, яке створюється усіма $n-1$ зарядами (за виключенням i -го) у точці, де розміщений заряд Q_i .

19 Потенціал пов'язаний із напруженістю електричного поля співвідношенням

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi.$$

У випадку електричного поля, яке має сферичну симетрію, цей зв'язок виражається формулою

$$\vec{E} = -\frac{d\varphi}{dr} \frac{\vec{r}}{r},$$

або в скалярній формі

$$E = -\frac{d\varphi}{dr},$$

а у випадку однорідного поля, тобто поля, напруженість якого у кожній точці однакова як за абсолютним значенням, так і за напрямком,

$$E = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{d},$$

де φ_1 і φ_2 – потенціали точок двох екіпотенціальних поверхонь; d – відстань між цими поверхнями вздовж електричної силової лінії.

20 Робота, що здійснюється електричним полем при переміщенні точкового заряду Q із однієї точки поля, яка має потенціал φ_1 , в іншу, яка має потенціал φ_2 ,

$$A = Q(\varphi_1 - \varphi_2), \text{ або } A = Q \int_L E_l dl,$$

де E_l – проекція вектора напруженості \vec{E} на напрямок переміщення; dl – переміщення.

У випадку однорідного поля остання формула набуває вигляду

$$A = QEl \cos \alpha,$$

де \vec{l} – переміщення; α – кут між напрямками вектора \vec{E} і переміщення \vec{l} .

Задачі для розв'язання на практичному занятті

1 (1-1) Дві кульки, масою $m = 0,1$ г кожна, підвішені в одній точці на нитках довжиною $l = 20$ см. Отримавши однаковий заряд, кульки розійшлися так, що нитки утворили між собою кут $\alpha = 60^\circ$. Знайти заряд кожної кульки.

2 (1-2) Три однакових заряди $Q = 1$ нКл кожний - розміщені у вершинах рівностороннього трикутника. Який негативний заряд Q_1 потрібно помістити у центрі трикутника, щоб його притягання урівноважило сили взаємного відштовхування зарядів? Чи буде ця рівновага стійкою?

3 (1-3) Тонке півкільце радіусом $R = 10$ см несе рівномірно розподілений заряд з лінійною густиною $\tau = 1$ мкКл/м. У центрі кривизни півкільця розміщений заряд $Q = 20$ нКл. Визначити силу F взаємодії точкового заряду і зарядженого півкільця.

4 (1-4) Прямий металевий стрижень діаметром $d = 5$ см і довжиною $l = 4$ м несе рівномірно розподілений вздовж його поверхні заряд $Q = 500$ нКл. Визначити напруженість E поля в точці, яка розміщена проти середини стрижня на відстані $a = 1$ см від його поверхні.

5 (1-5) У центрі кулі радіусом $R = 20$ см розміщений точковий заряд $Q = 10$ нКл. Визначити потік Φ_E вектора напруженості через частину поверхні кулі площею $S = 20$ см².

6 (1-6) Тонкі стрижні утворюють квадрат із стороною довжиною a . Стрижні заряджені з лінійною густиною $\tau = 1,33$ нКл/м. Визначити потенціал φ у центрі квадрата.

Домашнє завдання

7 (1-7) Дві однаково заряджені кульки підвішені в одній точці на нитках однакової довжини. При цьому нитки розійшлися на кут α . Кульки занурюються у масло, густина якого $\rho_0 = 8 \cdot 10^2$ кг/м³. Визначити діелектричну проникність ϵ масла, якщо кут розходження ниток при зануренні у масло залишається незмінним. Густина матеріалу кульок $\rho = 1,6 \cdot 10^3$ кг/м³.

8 (1-8) У вершинах квадрата розміщені однакові заряди - $Q = 0,3$ нКл кожний. Який негативний заряд Q_1 потрібно помістити у

центрі квадрата, щоб сила взаємного відштовхування позитивних зарядів була урівноважена силою тяжіння негативного заряду?

9 (1-9) Тонке кільце радіусом $R = 10$ см несе рівномірно розподілений заряд $Q = 0,1$ мкКл. На перпендикулярі до площини кільця, який проведений з його середини знаходиться точковий заряд $Q_1 = 10$ нКл. Визначити силу F , яка діє на точковий заряд Q з боку зарядженого кільця, якщо він віддалений від центра кільця на а) $l_1 = 20$ см; б) $l_2 = 2$ м.

10 (1-10) Нескінченно довга тонкостінна металева трубка радіусом $R = 2$ см несе рівномірно розподілений вздовж поверхні заряд ($\sigma = 1$ нКл/м²). Визначити напруженість E поля в точках, які віддалені від осі трубки на відстані $r_1 = 1$ см; $r_2 = 3$ см. Побудувати графік залежності $E(r)$.

11 (1-11) Нескінченна площина несе заряд, рівномірно розподілений із поверхневою густиною $\sigma = 1$ мкКл/м². На деякій відстані від площини паралельно до неї розміщене коло радіусом $r = 10$ см. Визначити потік Φ_E вектора напруженості через це коло.

12 (1-12) Нескінченно довга тонка пряма нитка несе рівномірно розподілений вздовж довжини нитки заряд із лінійною густиною $\tau = 0,01$ мкКл/м. Визначити різницю потенціалів $\Delta\varphi$ двох точок поля, віддалених від нитки на $r_1 = 2$ см і $r_2 = 4$ см.

2 ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ У ВАКУУМІ ТА ДІЕЛЕКТРИКАХ

Зведення основних формул розділу

1 Диполь – це система двох точкових, рівних за модулем і протилежних за знаком зарядів, які розміщені на деякій відстані один від одного.

Електричний момент \vec{p} диполя є вектор, напрямлений від негативного заряду до позитивного і який дорівнює добутку заряду $|Q|$ на вектор \vec{l} , що проведений від негативного заряду до позитивного і має назву плече диполя, тобто

$$\vec{p} = |Q|\vec{l}.$$

Диполь має назву точкового, якщо плече l диполя значно менше відстані r від центра диполя до точки, у якій нас цікавить дія диполя ($l \ll r$).

2 Напруженість поля точкового диполя

$$E = \frac{p}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^3} \sqrt{1 + 3\cos^2 \alpha},$$

де \vec{p} – електричний момент диполя; r – абсолютне значення радіуса-вектора, який проведений від центра диполя до точки, напруженість поля в якій нас цікавить; α – кут між радіусом-вектором \vec{r} та плечем \vec{l} диполя.

Напруженість поля точкового диполя у точці, яка лежить на осі диполя ($\alpha = 0$),

$$E = \frac{p}{2\pi\epsilon_0\epsilon r^3}$$

і в точці, яка лежить на перпендикулярі до плеча диполя, що проведений із його середини ($\alpha = \pi/2$),

$$E = \frac{p}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^3}.$$

3 Потенціал поля точкового диполя

$$\varphi = \frac{p}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2} \cos \alpha.$$

Потенціал поля точкового диполя в точці, яка лежить на осі диполя ($\alpha = 0$),

$$\varphi = \frac{p}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}$$

і в точці, яка лежить на перпендикулярі до плеча диполя, що проведений із його середини ($\alpha = \pi/2$),

$$\varphi = 0.$$

Напруженість і потенціал неточкового диполя визначаються як для системи зарядів.

4 Механічний момент, який діє на диполь з електричним моментом \vec{p} , розміщений в однорідному електричному полі з напруженістю \vec{E} ,

$$\vec{M} = [\vec{p}\vec{E}], \text{ або } M = pE\sin\alpha,$$

де α – кут між напрямками векторів \vec{p} та \vec{E} .

У неоднорідному електричному полі, окрім механічного моменту (пари сил), на диполь діє ще деяка сила. У випадку поля, яке має симетрію відносно осі x , ця сила виражається співвідношенням

$$F_x = p \frac{\partial E}{\partial x} \cos\alpha,$$

де $\frac{\partial E}{\partial x}$ - часткова похідна напруженості поля, яка характеризує ступінь неоднорідності поля у напрямку осі x .

При $\alpha > \pi/2$ сила F_x позитивна. Це означає, що під дією її диполь втягується в область сильного поля.

5 Електричне зміщення \vec{D} пов'язане з напруженістю \vec{E} електричного поля наступним співвідношенням

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}.$$

Це співвідношення може бути застосованим лише для ізотропних діелектриків.

6 Потік вектора електричного зміщення визначається аналогічно потоку вектора напруженості електричного поля:

- у випадку однорідного поля

$$\Delta\Psi = D\Delta S \cos\alpha;$$

- у випадку неоднорідного поля і довільної поверхні

$$\Psi = \int_S D_n dS,$$

де D_n – проекція вектора \vec{D} на напрямок нормалі до елемента поверхні, площа якої дорівнює dS .

7 Теорема Гаусса. Потік вектора електричного зміщення через будь-яку замкнену поверхню дорівнює алгебраїчній сумі сторонніх зарядів, які містяться в середині цієї поверхні:

$$\oint_S D_n dS = \sum_{i=1}^n Q_i,$$

де n – кількість сторонніх зарядів (із власним знаком), що містяться всередині замкненої поверхні.

Задачі для розв'язання на практичному занятті

13 (2-1) Сто однакових крапель ртуті, заряджених до потенціалу $\varphi = 20$ В, зливаються в одну велику краплю. Який потенціал φ_1 утвореної краплі?

14 (2-2) Електричне поле утворено двома однаковими позитивними зарядами Q . Знайти роботу $A_{1,2}$ сил поля з переміщення заряду $Q_1 = 10$ нКл із точки 1 з потенціалом $\varphi_1 = 300$ В у точку 2 (рис. 1).

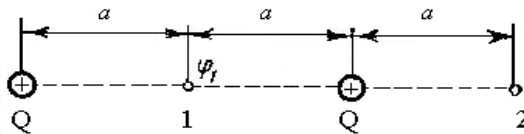


Рисунок 1

15 (2-3) Електричне поле створено рівномірно розподіленим вздовж кільця зарядом ($\tau = 1$ мкКл/м). Визначити роботу $A_{1,2}$ сил поля з переміщення заряду $Q = 10$ нКл із точки 1 (у центрі кільця) в точку 2, яка розміщена на перпендикулярі до площини кільця (рис.2).

16 (2-4) Відстань l між зарядами $Q = \pm 3,2$ нКл диполя дорівнює 12 см. Знайти напруженість E і потенціал φ поля, створеного диполем у точці, яка віддалена на $r = 8$ см як від першого, так і від другого заряду.

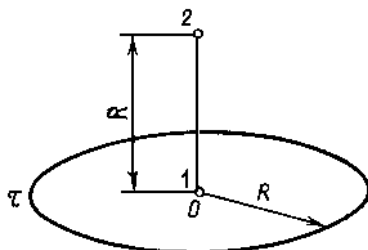


Рисунок 2

17 (2-5) Два точкових диполя з електричними моментами $p_1 = 1$ пКл·м та $p_2 = 4$ пКл·м розміщені на відстані $r = 2$ см один від одного. Знайти силу їх взаємодії, якщо осі диполів лежать на одній прямій.

18 (2-6) Диполь з електричним моментом $p = 100$ пКл·м вільно установлюється в однорідному електричному полі з напруженістю $E = 150$ кВ/м. Визначити роботу A , яка необхідна для того, щоб повернути диполь на кут $\alpha = 180^\circ$.

Домашнє завдання

19 (2-7) Тонка кругла пластина несе рівномірно розподілений вздовж площини заряд $Q = 1$ нКл. Радіус R пластини дорівнює 5 см. Визначити потенціал φ електричного поля у двох точках: а) у центрі пластини; б) у точці, яка лежить від осі, перпендикулярній площині пластини, і розміщена від центра пластини на $a = 5$ см.

20 (2-8) Визначити роботу $A_{1,2}$ з переміщення заряду $Q_1 = 50$ нКл із точки 1 у точку 2 (рис. 3) в полі, створеному двома зарядами, модуль $|Q|$ яких дорівнює 1 мкКл і $a = 0,1$ м.

21 (2-9) Нескінченна пряма нитка несе рівномірно розподілений заряд ($\tau = 0,1$ мкКл/м). Визначити роботу $A_{1,2}$ сил поля з переміщення заряду $Q = 50$ нКл із точки 1 у точку 2 (рис. 4).

22 (2-10) Диполь з електричним моментом $p = 0,12$ нКл·м утворений двома точковими зарядами $Q = \pm 1$ нКл. Знайти напруженість E і потенціал φ електричного поля в точках А і В

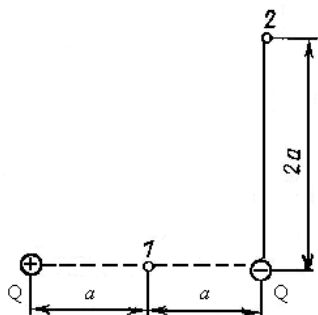


Рисунок 3

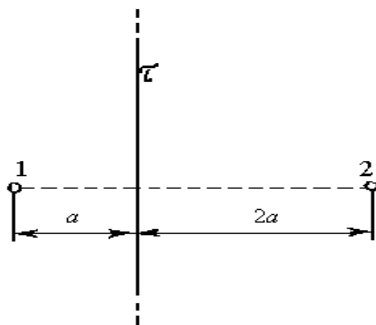


Рисунок 4

(рис. 5), які розміщені на відстані $r = 8$ см від центра диполя.

23 (2-11) Два точкових диполі з електричними моментами $p_1 = 20$ пКл·м і $p_2 = 50$ пКл·м розміщені на відстані $r = 10$ см один від одного так, що їх осі лежать на одній прямій. Знайти взаємну потенціальну енергію диполів, яка відповідає їх стійкій рівновазі.

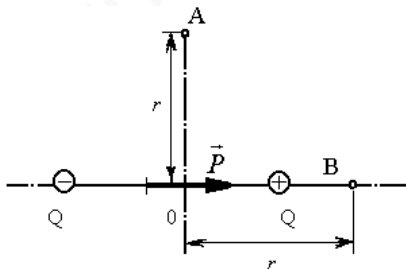


Рисунок 5

24 (2-12) Диполь з електричним моментом $p = 100$ пКл·м вільно установився в однорідному електричному полі напруженістю $E = 10$ кВ/м. Знайти зміну потенціальної енергії $\Delta\Pi$ диполя при повертанні його на кут $\alpha = 60^\circ$.

3 ПРОВІДНИКИ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ

Зведення основних формул розділу

1 Електроємність ізольованого провідника або конденсатора

$$C = dQ/d\varphi,$$

де dQ – заряд, переданий провіднику (конденсатору); $d\varphi$ – зміна потенціалу, яка викликана цим зарядом.

2 Електроємність ізольованої провідникової сфери радіусом R , яка розміщена у нескінченному середовищі з діелектричною проникністю ε ,

$$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon R.$$

Якщо сфера порожня і заповнена діелектриком, то електроємність її від цього не змінюється.

3 Електроємність плоского конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d},$$

де S – площа кожної з пластин; d – відстань між ними; ε – діелектрична проникність діелектрика, який заповнює простір між пластинами.

Електроємність плоского конденсатора, який заповнений n шарами діелектрика товщиною d_i кожний, діелектричні проникності яких ε_i (шаруватий конденсатор),

$$C = \frac{\varepsilon_0 S}{d_1/\varepsilon_1 + d_2/\varepsilon_2 + \dots + d_n/\varepsilon_n}.$$

4 Електроємність сферичного конденсатора (дві концентричні сфери радіусами R_1 і R_2 , простір між якими заповнено діелектриком з діелектричною проникністю ε)

$$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon R_1 R_2 / (R_2 - R_1).$$

5 Електроємність циліндричного конденсатора (два коаксіальних циліндри довжиною l і радіусами R_1 і R_2 , простір між якими заповнено діелектриком з діелектричною проникністю ϵ)

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln(R_2/R_1)}.$$

6 Електроємність послідовно з'єднаних конденсаторів:

- в загальному випадку $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$;

де n – кількість конденсаторів;

- у випадку двох конденсаторів $C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$;

- у випадку n однакових конденсаторів з електроємністю C_1 кожний $C = C_1/n$.

7 Електроємність паралельно з'єднаних конденсаторів:

- в загальному випадку $C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$,

де n – кількість конденсаторів;

- у випадку двох конденсаторів $C = C_1 + C_2$;

- у випадку n однакових конденсаторів з електроємністю C_1 кожний $C = nC_1$.

Задачі для розв'язання на практичному занятті

25 (3-1) Дві металеві кулі радіусами $R_1 = 2$ см і $R_2 = 6$ см з'єднані провідником, ємністю якого можна знехтувати. Кулям надано заряд $Q = 1$ нКл. Знайти поверхневу густину σ зарядів на кулях.

26 (3-2) На пластинах плоского конденсатора рівномірно розподілений заряд з поверхневою густиною $\sigma = 0,2$ мкКл/м². Відстань d між пластинами дорівнює 1 мм. На скільки зміниться різниця потенціалів на його обкладках при збільшенні відстані d між пластинами до 3 мм?

27 (3-3) Електроємність C плоского конденсатора дорівнює $1,5 \text{ мкФ}$. Відстань d між пластинами дорівнює 5 мм . Яка буде електроємність C конденсатора, якщо на нижню пластину покласти лист ебоніту товщиною $d_1 = 3 \text{ мм}$?

28 (3-4) Конденсатор електроємністю $C_1 = 0,2 \text{ мкФ}$ був заряджений до різниці потенціалів $U_1 = 320 \text{ В}$. Після його паралельного з'єднання з іншим конденсатором, зарядженим до різниці потенціалів $U_2 = 450 \text{ В}$, напруга U на ньому змінилася до 400 В . Визначити ємність C_2 другого конденсатора.

29 (3-5) Три однакових плоских конденсатори з'єднані послідовно. Електроємність C такої батареї конденсаторів дорівнює 89 пФ . Площа S кожної пластини дорівнює 100 см^2 . Діелектрик – скло. Яка товщина d скла?

30 (3-6) Конденсатори електроємностями $C_1 = 10 \text{ нФ}$, $C_2 = 40 \text{ нФ}$, $C_3 = 2 \text{ нФ}$, $C_4 = 30 \text{ нФ}$ з'єднані так, як це показано на рис. 6. Визначити електроємність C з'єднання.

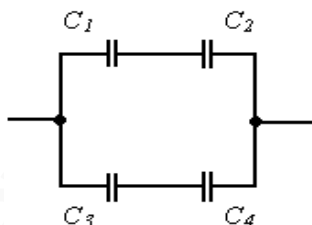


Рисунок 6

Домашнє завдання

31 (3-7) Куля радіусом $R_1 = 6 \text{ см}$ заряджена до потенціалу $\varphi_1 = 300 \text{ В}$, а куля радіусом $R_2 = 4 \text{ см}$ - до потенціалу $\varphi_2 = 500 \text{ В}$. Визначити потенціал φ куль після того, як їх з'єднали металевим провідником. Ємністю з'єднувального провідника знехтувати.

32 (3-8) Між пластинами плоского конденсатора розміщена скляна пластинка, яка щільно прилягає до стінки конденсатора. Конденсатор заряджений до різниці потенціалів $U_1 = 100 \text{ В}$. Яка буде різниця потенціалів U_2 , якщо вийняти скляну пластинку із конденсатора?

33 (3-9) Конденсатор електроємністю $C_1 = 0,6$ мкФ був заряджений до різниці потенціалів $U_1 = 300$ В і з'єднаний з іншим конденсатором електроємністю $C_2 = 0,4$ мкФ, зарядженим до різниці потенціалів $U_2 = 150$ В. Знайти заряд ΔQ , який перетікає з пластин першого конденсатора на другий.

34 (3-10) Конденсатори електроємностями $C_1=2$ мкФ, $C_2= 2$ мкФ, $C_3 = 3$ мкФ, $C_4 = 1$ мкФ з'єднані так, як це показано на рис. 7. Різниця потенціалів на обкладках четвертого конденсатора $U_4 = =100$ В. Знайти заряди і різниці потенціалів на обкладках кожного конденсатора, а також загальний заряд і різницю потенціалів батареї конденсаторів.

35 (3-11) Визначити електроємність схеми, наведеної на рис. 8, де $C_1 = 1$ пФ, $C_2 = 2$ пФ, $C_3 = 2$ пФ, $C_4 = 4$ пФ, $C_5 = 3$ пФ.

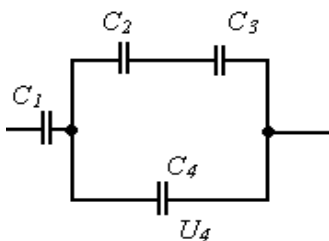


Рисунок 7

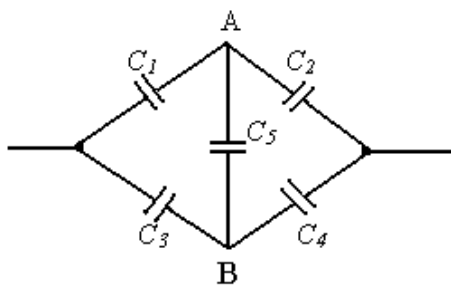


Рисунок 8

4 ЕНЕРГІЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

Зведення основних формул розділу

1 Енергія зарядженого провідника виражається через заряд Q , потенціал φ та електроємність C провідника такими співвідношеннями:

$$W = \frac{1}{2} C \varphi^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} Q \varphi.$$

2 Енергія зарядженого конденсатора

$$W = \frac{1}{2} C U^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} Q U,$$

де C – електроємність конденсатора; U – різниця потенціалів на його пластинах.

3 Об'ємна густина енергії (енергія електричного поля, що припадає на одиницю об'єму)

$$w = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon E^2 = \frac{1}{2} E D,$$

де \vec{E} – напруженість електричного поля в середовищі з діелектричною проникністю ε ; \vec{D} – електричне зміщення.

Задачі для розв'язання на практичному занятті

36 (4-1) Чому дорівнює потенціальна енергія W системи чотирьох однакових точкових зарядів $Q = 10$ нКл, розміщених у вершинах квадрата зі стороною $a = 10$ см?

37 (4-2) Яка кількість теплоти Q виділиться при розрядці плоского конденсатора, якщо різниця потенціалів U між пластинами дорівнює 15 кВ, відстань $d = 1$ мм, діелектрик – слюда і площа S кожної пластини складає 300 см²?

38 (4-3) Плоский повітряний конденсатор складається із двох круглих пластин радіусом $r = 10$ см кожна. Відстань d_1 між пластинами дорівнює 1 см. Конденсатор зарядили до різниці потенціалів $U = 1,2$ кВ і відключили від джерела струму. Яку роботу A потрібно здійснити, щоб, віддаляючи пластини одна від одної, збільшити відстань між ними до $d_2 = 3,5$ см?

39 (4-4) Простір між пластинами плоского конденсатора заповнено діелектриком (фарфор), об'єм V якого дорівнює 100 см^3 . Поверхнева густина заряду σ на пластинах конденсатора дорівнює $8,85 \text{ нКл/м}^2$. Визначити роботу A , яку потрібно здійснити, щоб видалити діелектрик із конденсатора. Тертям діелектрика і пластин знехтувати.

40 (4-5) Ізольована металева сфера електроємністю $C = 10 \text{ пФ}$ заряджена до потенціалу $\varphi = 3 \text{ кВ}$. Визначити енергію W поля, яке розміщене в сферичному шарі, обмеженому сферою і концентричної з нею сферичною поверхнею, радіус якої у три рази більший ніж радіус сфери.

41 (4-6) Парафінова куля радіусом $R = 10 \text{ см}$ заряджена рівномірно за об'ємом з об'ємною густиною $\rho = 10 \text{ нКл/м}^3$. Визначити енергію W_1 електричного поля, зосередженого у самій кулі, і енергію W_2 поза нею.

Домашнє завдання

42 (4-7) Визначити потенціальну енергію Π системи чотирьох точкових зарядів, розміщених у вершинах квадрата зі стороною $a = 10 \text{ см}$. Заряди однакові за абсолютним значенням $Q = 10 \text{ нКл}$, але два з них негативні. Розглянути два можливих випадки розміщення зарядів.

43 (4-8) Відстань d між пластинами плоского конденсатора дорівнює 2 см , різниця потенціалів $U = 6 \text{ кВ}$. Заряд Q кожної пластини дорівнює 10 нКл . Визначити енергію W поля конденсатора і силу F взаємного притягання пластин.

44 (4-9) Плоский повітряний конденсатор електроємністю $C = 1,11 \text{ нФ}$ заряджений до різниці потенціалів $U = 300 \text{ В}$. Після вимикання від джерела струму відстань між пластинами конденсатора була збільшена у п'ять разів. Визначити: а) різницю потенціалів U на обкладинках конденсатора після їх розсування; б) роботу A зовнішніх сил з розсування пластин.

45 (4-10) Електроємність C плоского конденсатора дорівнює 111 пФ . Діелектрик – фарфор. Конденсатор зарядили до різниці потенціалів $U = 600 \text{ В}$ і відключили від джерела напруги. Яку роботу A потрібно здійснити, щоб вийняти діелектрик із конденсатора? Тертям знехтувати.

46 (4-11) Електричне поле створено зарядженою ($Q = 0,1$ мкКл) сферою радіусом $R = 10$ см. Яка енергія W поля, що міститься в об'ємі, обмеженому сферою і концентричною з нею сферичною поверхнею, радіус якої у два рази більший, ніж радіус сфери.

5 ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

Зведення основних формул розділу

1 Сила постійного струму

$$I = Q/t,$$

де Q – заряд, що пройшов через поперечний переріз провідника за час t .

2 Густина електричного струму є векторна величина, яка дорівнює відношенню сили струму до площі S поперечного перерізу провідника:

$$\vec{j} = \frac{I}{S} \vec{k},$$

де \vec{k} – одиничний вектор, який за напрямком співпадає з напрямком руху позитивних носіїв заряду.

3 Опір однорідного провідника

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

де ρ – питомий опір речовини провідника; l – його довжина.

4 Провідність Ω провідника і питома провідність σ речовини:

$$\Omega = \frac{1}{R}, \quad \sigma = \frac{1}{\rho}.$$

5 Залежність питомого опору від температури

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t),$$

де ρ і ρ_0 – питомі опори відповідно при t і 0°C ; t – температура (за шкалою Цельсія); α – температурний коефіцієнт опору.

6 Опір з'єднаних провідників:

- послідовно
$$R = \sum_{i=1}^n R_i ;$$

- паралельно
$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} ,$$

де R_i – опір i -го провідника; n – кількість провідників.

7 Закон Ома в інтегральній формі:

- для неоднорідної ділянки кола
$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + \xi_{12}}{R} = \frac{U}{R} ;$$

- для однорідної ділянки кола ($\xi_{12} = 0$)
$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} = \frac{U}{R} ;$$

- для замкненого кола ($\varphi_1 = \varphi_2$)
$$I = \frac{\xi}{R} ,$$

де $(\varphi_1 - \varphi_2)$ – різниця потенціалів на кінцях ділянки кола; ξ_{12} – е.р.с. джерел струму, що входять у цю ділянку; U – напруга на ділянці кола; R – опір кола (ділянки кола); ξ – ЕРС усіх джерел струму кола.

8 Правила Кірхгофа.

Перше правило: алгебраїчна сума сил струмів, що сходяться у вузлі, дорівнює нулю, тобто

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0 ,$$

де n – кількість струмів, що сходяться у вузлі.

Друге правило: у замкненому контурі алгебраїчна сума напруг на всіх ділянках контуру дорівнює алгебраїчній сумі електрорушійних сил, тобто

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{i=1}^k \xi_i,$$

де I_i – сила струму на i -й ділянці; R_i – активний опір на i -й ділянці; ξ_i – ЕРС джерел струму на i -й ділянці; n – кількість ділянок, що містять активний опір; k – кількість ділянок, що містять джерела струму.

9 Робота, яка здійснюється електростатичним полем і сторонніми силами на ділянці кола постійного струму за час t ,

$$A = IUt.$$

10 Потужність струму

$$P = IU.$$

11 Закон Джоуля-Ленца

$$Q = I^2 Rt,$$

де Q – кількість теплоти, що виділяється на ділянках кола за час t .

Закон Джоуля-Ленца має місце за умови, що ділянка кола нерухома і в ній не здійснюються хімічні перетворення.

12 Густина струму \vec{j} , середня швидкість $\langle \vec{v} \rangle$ впорядкованого руху носіїв заряду та їх концентрація n пов'язані співвідношенням

$$\vec{j} = en \langle \vec{v} \rangle,$$

де e – елементарний заряд.

13 Закон Ома у диференціальній формі

$$\vec{j} = \sigma \vec{E},$$

де σ – питома провідність провідника; \vec{E} – напруженість електричного поля.

14 Закон Джоуля-Ленца у диференціальній формі

$$\omega = \sigma E^2,$$

де ω – об'ємна густина теплової потужності.

15 Закони електролізу Фарадея.

Перший закон

$$m = kQ,$$

де m – маса речовини, що виділилась на електроді під час проходження через електроліт електричного заряду Q ;

k – електрохімічний еквівалент речовини.

Другий закон

$$k = \frac{\mu}{FZ},$$

де F – стала Фарадея ($F = 96,5$ кКл/моль); μ – молярна маса іонів даної речовини; Z – валентність іонів.

Об'єднаний закон

$$m = \frac{1}{F} \frac{\mu}{Z} Q = \frac{1}{F} \frac{\mu}{Z} It,$$

де I – сила струму, що проходить через електроліт; t – час протягом якого протікав струм.

16 Рухливість іонів

$$b = \frac{\langle v \rangle}{E},$$

де $\langle v \rangle$ - середня швидкість впорядкованого руху іонів;

E – напруженість електричного поля.

17 Закон Ома у диференціальній формі для електролітів і газів при самостійному розряді в області, яка далека від насичення,

$$\vec{j} = Qn(b_+ + b_-)\vec{E},$$

де Q – заряд іона; n – концентрація іонів; b_+ і b_- - рухливість відповідно позитивних і негативних іонів.

18 Густина струму насичення

$$I_{нас} = Qn_0d,$$

де n_0 – кількість пар іонів, що створює іонізатор у одиниці об'єму за одиницю часу; d – відстань між електродами ($n_0 = N/(Vt)$), де N – кількість пар іонів, що створює іонізатор за час t у просторі між електродами; V – об'єм цього простору).

Задачі для розв'язання на практичному занятті

47 (5-1). Знайти опір R графітового провідника, виготовленого у вигляді прямого колового усіченого конуса висотою $h = 20$ см і радіусами основ $r_1 = 12$ мм і $r_2 = 8$ мм. Температура t провідника дорівнює 20°C .

48 (5-2) До джерела струму з ЕРС $\xi = 1,5$ В приєднали котушку з опором $R = 0,1$ Ом. Амперметр показав силу струму, яка дорівнює $I_1 = 0,5$ А. Коли до джерела струму приєднали послідовно ще одне джерело струму з тією же ЕРС, сила струму I у тій самій котушці стала дорівнювати $0,4$ А. Визначити внутрішні опори r_1 і r_2 першого і другого джерел струму.

49 (5-3) Дві батареї акумуляторів ($\xi_1 = 10$ В; $r_1 = 1$ Ом; $\xi_2 = 8$ В; $r_2 = 2$ Ом) і реостат ($R = 6$ Ом) з'єднані, як показано на рис. 9. Знайти силу струму в батареях та реостаті.

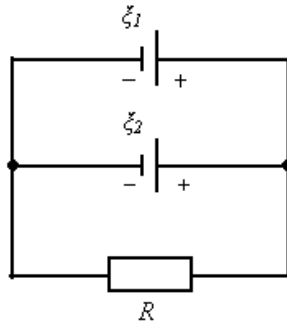


Рисунок 9

50 (5-4) До батареї акумуляторів, ЕРС ξ якої дорівнює 2 В і внутрішній опір $r = 0,5$ Ом, приєднали провідник. Визначити:

а) опір R провідника, при якому потужність, що виділяється на ньому, максимальна; б) потужність P , яка при цьому виділяється у провіднику.

51 (5-5) Вздовж провідника опором $R = 3$ Ом тече струм, сила якого зростає. Кількість теплоти Q , що виділилась у провіднику за час $t = 8$ с, дорівнює 200 Дж. Визначити заряд q , що протікає за цей час вздовж провідника. В момент часу, взятий за початковий, сила струму у провіднику дорівнює нулю.

52 (5-6) У мідному провіднику об'ємом $V = 6$ см³ при протіканні по ньому постійного струму за час $t = 1$ хв виділилась кількість теплоти $Q = 216$ Дж. Визначити напруженість E електричного поля у провіднику.

Домашнє завдання

53(5-7) Визначити густину струму j у залізному провіднику довжиною $l = 10$ м, якщо провід перебуває під напругою $U = 6$ В.

54 (5-8) Дві групи із трьох послідовно з'єднаних елементів з'єднані паралельно. ЕРС ξ кожного елемента дорівнює 1,2 В, внутрішній опір $r = 0,2$ Ом. Отримана батарея замкнена на зовнішній опір $R = 1,5$ Ом. Знайти силу струму I у зовнішньому колі.

55 (5-9) Два елементи ($\xi_1 = 1,2$ В; $r_1 = 0,1$ Ом; $\xi_2 = 0,9$ В; $r_2 = 0,3$ Ом) з'єднані однойменними полюсами. Опір з'єднувальних провідників дорівнює $0,2$ Ом. Визначити силу струму I у колі.

56 (5-10) ЕРС ξ батареї дорівнює 20 В. Опір R зовнішнього кола дорівнює 2 Ом, сила струму $I = 4$ А. Знайти ККД батареї. При якому значенні зовнішнього опору R ККД буде дорівнювати 99% ?

57 (5-11) Обмотка електричного кип'ятильника має дві секції. Якщо ввімкнена тільки перша секція, то вода закипає через $t_1 = 15$ хв, якщо тільки друга, то через $t_2 = 30$ хв. Через скільки хвилин закипає вода, якщо обидві секції ввімкнуті послідовно, паралельно?

58 (5-12) Сила струму у провіднику рівномірно зростає від $I_0 = 0$ до деякого максимального значення протягом часу $\tau = 10$ с. За цей час у провіднику виділилась кількість теплоти $Q = 1$ кДж. Визначити швидкість наростання струму у провіднику, якщо опір R його дорівнює 3 Ом.

6 МАГНІТНЕ ПОЛЕ У ВАКУУМІ І СЕРЕДОВИЩІ

Зведення основних формул розділу

1 Закон Біо-Савара-Лапласа

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \left[d\vec{l} \times \frac{\vec{r}}{r^3} \right] I,$$

де $d\vec{B}$ – магнітна індукція поля, яку створює елемент провідника зі струмом; μ – магнітна проникність; μ_0 – магнітна стала ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м); $d\vec{l}$ – вектор, який дорівнює за модулем довжині dl провідника і збігається за напрямком зі струмом (елемент провідника); I – сила струму; \vec{r} – радіус-вектор, проведений від середини елемента провідника до точки, магнітна індукція якої визначається.

Модуль вектора $d\vec{B}$ виражається формулою

$$dB = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I \sin \alpha}{r^2} dl,$$

де α - кут між векторами $d\vec{l}$ і \vec{r} .

2 Магнітна індукція \vec{B} пов'язана з напруженістю \vec{H} магнітного поля співвідношенням

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H},$$

або у вакуумі

$$\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}.$$

3 Магнітна індукція в центрі колового провідника зі струмом

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2 R},$$

де R – радіус кривизни провідника.

4 Магнітна індукція поля, що створюється нескінченно довгим прямим провідником зі струмом,

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2\pi r},$$

де r – відстань від осі провідника.

Магнітна індукція поля, що створюється відрізком провідника

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi r_0} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2).$$

Позначення зрозумілі із рис. 10 а. Вектор індукції \vec{B} перпендикулярний до площини креслення, спрямований до нас, і тому зображений точкою.

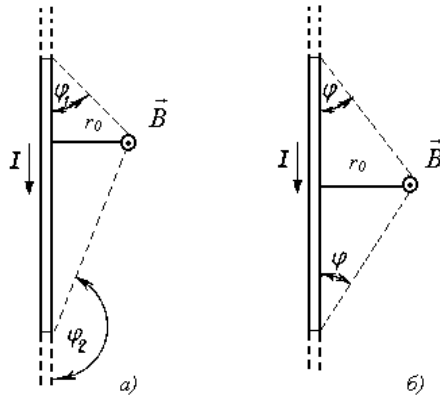


Рисунок 10

При симетричному розміщенні кінців провідника відносно точки, в якій визначається магнітна індукція (рис. 10 б), $-\cos \varphi_2 = \cos \varphi_1 = \cos \varphi$ і, значить,

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} \frac{I}{r_0} \cos \varphi.$$

5 Магнітна індукція поля, що створює соленоїд у середній його частині (або тороїда на його осі),

$$B = \mu_0 \mu n I,$$

де n – кількість витків, що припадає на одиницю довжини соленоїда; I – сила струму в одному витку.

6 Принцип суперпозиції магнітних полів: магнітна індукція \vec{B} результуючого поля дорівнює векторній сумі магнітних індукцій \vec{B}_1 , \vec{B}_2 , ..., \vec{B}_n полів, що існують у данній точці, тобто

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i.$$

У випадку накладання двох полів

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2,$$

а абсолютне значення вектора магнітної індукції

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + 2B_1B_2 \cos \alpha},$$

де α – кут між векторами \vec{B}_1 і \vec{B}_2 .

7 Закон Ампера. Сила, яка діє на провідник зі струмом в магнітному полі,

$$\vec{F} = [\vec{l} \vec{B}] I,$$

де I – сила струму; \vec{l} – вектор, який дорівнює за модулем довжині l провідника і збігається за напрямком зі струмом; \vec{B} – магнітна індукція поля.

Модуль вектора \vec{F} визначається таким чином:

$$F = BIl \sin \alpha,$$

де α – кут між векторами \vec{l} і \vec{B} .

8 Сила взаємодії двох прямих нескінченно довгих паралельних провідників зі струмами I_1 і I_2 , які розміщені на відстані d один від одного, що діє на відрізок провідника довжиною l , виражається формулою

$$F = \frac{\mu_0 \mu I_1 I_2 l}{2\pi d}.$$

9 Магнітний момент контуру зі струмом

$$\vec{p}_m = I \vec{S},$$

де \vec{S} – вектор, який дорівнює за модулем площі S , яку охоплює контур, і збігається за напрямком з нормаллю до його площини.

10 Механічний момент, який діє на контур зі струмом, розміщений в однорідному магнітному полі

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \vec{B}].$$

Модуль механічного моменту

$$M = p_m B \sin \alpha,$$

де α – кут між векторами \vec{p}_m і \vec{B} .

11 Потенціальна (механічна) енергія контуру зі струмом в магнітному полі

$$\Pi_{\text{мех}} = \vec{p}_m \vec{B} = p_m B \cos \alpha.$$

12 Сила, яка діє на контур зі струмом в магнітному полі (змінному вздовж осі x),

$$F = p_m \frac{\partial B}{\partial x} \cos \alpha,$$

де $\frac{\partial B}{\partial x}$ - зміна магнітної індукції вздовж осі x , розрахована на одиницю довжини; α - кут між векторами \vec{p}_m і \vec{B} .

13 Закон повного струму для струму провідності: циркуляція вектора напруженості \vec{H} магнітного поля вздовж замкненого контуру, що охоплюється струмом I , виражається формулою

$$\oint H_l dl = I,$$

де H_l – проекція вектора \vec{H} на напрямок дотичної до контуру, що містить елемент dl ; I – сила струму, що охоплюється контуром.

Якщо контур охоплює n струмів, то

$$\oint H_l dl = \sum_{i=1}^n I_i,$$

де $\sum_{i=1}^n I_i$ - алгебраїчна сума струмів, що охоплює контур.

14 Магнітний потік Φ через плоский контур площею S :

- у випадку однорідного поля

$$\Phi = BS \cos \alpha, \text{ або } \Phi = B_n S,$$

де α - кут між вектором нормалі \vec{n} до площини контуру і вектором магнітної індукції \vec{B} ; B_n - проекція вектора \vec{B} на нормаль \vec{n} ($B_n = B \cos \alpha$);

- у випадку неоднорідного поля

$$\Phi = \int_S B_n dS,$$

де інтегрування ведеться за всією площею S .

15 Потокозчеплення, тобто повний магнітний потік, зчеплений зі всіма витками соленоїда або тороїда,

$$\Psi = N\Phi,$$

де Φ - магнітний потік через один виток; N - кількість витків соленоїда або тороїда.

16 Магнітне поле тороїда, сердечник якого зроблений із двох частин, виготовлених із речовин з різними магнітними проникностями:

а) магнітна індукція на осьовій лінії тороїда

$$B = \frac{IN}{l_1/(\mu_1\mu_0) + l_2/(\mu_2\mu_0)},$$

де I - сила струму в обмотці тороїда; N - кількість її витків; l_1 і l_2 - довжини першої і другої частин сердечника тороїда; μ_1 і μ_2 -

магнітні проникності речовин першої і другої частин сердечника тороїда; μ_0 – магнітна стала;

б) напруженість магнітного поля на осьовій лінії тороїда в першій і другій частинах сердечника

$$H_1 = \frac{B}{\mu_1 \mu_0}; \quad H_2 = \frac{B}{\mu_2 \mu_0};$$

в) магнітний потік в сердечнику тороїда

$$\Phi = \frac{IN}{l_1/(\mu_1 \mu_0 S) + l_2/(\mu_2 \mu_0 S)};$$

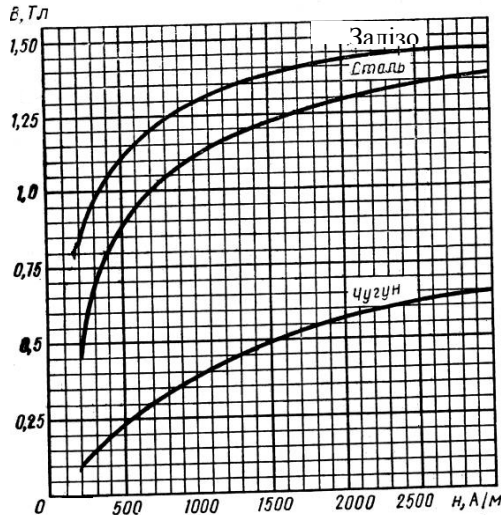
г) магнітний опір ділянки кола

$$R_m = \frac{l}{\mu \mu_0 S}.$$

17 Магнітна проникливість μ феромагнетика пов'язана з магнітною індукцією \vec{B} поля в ньому і напруженістю \vec{H} намагнічувального поля співвідношенням

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}.$$

18 Зв'язок між магнітною індукцією поля \vec{B} феромагнетика і напруженістю поля \vec{H} , що викликає намагнічування, виражається графічно.



Графік залежності магнітної індукції поля магнетика від напруженості зовнішнього поля

Задачі для розв'язання на практичному занятті

59 (6-1) Напруженість H магнітного поля в центрі колового витка радіусом $r = 8$ см дорівнює 30 А/м . Визначити напруженість H_1 на осі витка в точці, розміщеній на відстані $d = 6$ см від центра витка.

60 (6-2) По двох нескінченно довгих прямих провідниках, схрещених під прямим кутом, протікають струми, силою $I_1 = 30 \text{ А}$ і $I_2 = 40 \text{ А}$. Відстань d між проводами дорівнює 20 см. Визначити магнітну індукцію B у точці C (рис. 11), однаково віддалених від обох проводів на відстань, яка дорівнює d .

61 (6-3) По тонкому кільцю з дроту протікає струм. Не змінюючи сили струму в провіднику, йому надали форму квадрата. У скільки разів змінилася сила магнітної індукції у центрі контуру?

62 (6-4) По трьох паралельних прямих провідниках, які розміщені на однаковій відстані $a = 10$ см один від одного, протікають однакові струми силою $I = 100 \text{ А}$. У двох провідниках

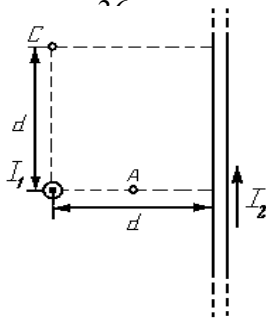


Рисунок 11

напрямки струмів збігаються. Визначити силу F , яка діє на відрізок довжиною $l = 1$ м кожного проводу.

63 (6-5) По тонкому стрижню довжиною $l = 20$ см рівномірно розподілений заряд $Q = 240$ нКл. Стрижень обертається зі сталою кутовою швидкістю $\omega = 10$ рад/с відносно осі, перпендикулярної до стрижня, і яка проходить через його середину. Визначити: а) магнітний момент p_m , що обумовлений обертанням зарядженого стрижня; б) відношення магнітного моменту до моменту імпульсу (p_m/L), якщо стрижень має масу $m = 12$ г.

64 (6-6) Тонке кільце радіусом $R = 10$ см має заряд $Q = 10$ нКл. Кільце рівномірно обертається з частотою $n = 10$ с⁻¹ відносно осі, перпендикулярної до площини кільця, і яка проходить через її центр. Знайти: а) магнітний момент \vec{p}_m колового струму, що створює кільце; б) відношення магнітного моменту до моменту імпульсу (p_m/L), якщо маса кільця дорівнює 10 г.

65 (6-7) По соленоїду довжиною $l = 1$ м без сердечника, який має $N = 10^3$ витків (рис. 12), протікає струм силою $I = 20$ А. Визначити циркуляцію вектора магнітної індукції вздовж контуру, зображеному на рис. 12 а, б.

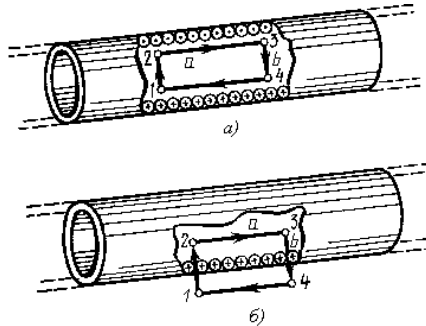


Рисунок 12

66 (6-8) Замкнений соленоїд (тор . . .) має $n = 10$ витків на кожний сантиметр довжини. По соленоїду протікає струм силою $I = 2$ А. Визначити магнітний потік Φ в сердечнику, якщо його переріз $S = 4$ см².

Примітка. Для визначення магнітної проникності в цій задачі скористатися графіком, який показує зв'язок між магнітною індукцією B поля у феромагнетика і напруженістю H намагнічувального поля. Явище гістерезису не враховувати.

Домашнє завдання

67 (6-9) По тонкому провідному кільцю радіусом $R = 10$ см протікає струм силою $I = 80$ А. Знайти магнітну індукцію B у точці, рівновіддаленій від всіх точок кільця на $r = 20$ см.

68 (6-10). Нескінченно довгий прямий провід зігнутий під прямим кутом. По провіднику протікає струм силою $I = 20$ А. Яка магнітна індукція B в точці A (рис. 13), якщо $r = 5$ см?

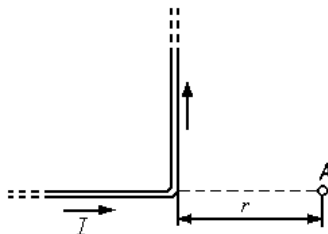


Рисунок 13

69 (6-11) По провіднику, зігнутому у вигляді правильного шестикутника зі стороною a , яка дорівнює 20 см, протікає струм силою $I = 100$ А. Знайти напруженість H магнітного поля в центрі шестикутника. Для порівняння визначити напруженість H_0 в центрі колового провідника, який збігається з колом, описаним біля цього шестикутника.

70 (6-12) По двох однакових квадратних плоских контурах зі стороною $a = 20$ см протікають струми силою $I = 10$ А у кожному. Визначити силу F взаємодії контурів, якщо відстань d між сторонами контурів дорівнює 2 мм.

71 (6-13) Диск радіусом $R = 10$ см несе рівномірно розподілений вздовж поверхні заряд $Q = 0,2$ мкКл. Він рівномірно обертається з частотою $n = 20$ с⁻¹ відносно осі, яка перпендикулярна до площини диска і проходить через його центр. Знайти: а) магнітний момент p_m колового струму, що створює диск; б) відношення магнітного моменту до моменту імпульсу (p_m/L), якщо маса диска дорівнює 100 г.

72 (6-14) Визначити циркуляцію вектора індукції вздовж контуру, що охоплює струми $I_1 = 10$ А, $I_2 = 15$ А, які протікають в одному напрямку, та струм $I_3 = 20$ А, який тече в протилежному напрямку.

73 (6-15) Залізне кільце має обмотку в один шар з $N = 500$ витків проводу. Середній діаметр d кільця дорівнює 25 см. Визначити магнітну індукцію B в залізі і магнітну проникність μ заліза, якщо сила струму I в обмотці: а) 0,5 А; б) 2,5 А.

Примітка. Для знаходження магнітної проникності в цій задачі скористатися графіком, який показує зв'язок між магнітною індукцією B поля у феромагнетиків і напруженістю H намагнічувального поля. Явище гістерезису не враховувати.

7 ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ

Зведення основних формул розділу

1 Робота переміщення замкнутого контуру зі струмом в магнітному полі

$$A = I\Delta\Phi,$$

де $\Delta\Phi$ – зміна магнітного потоку, який пронизує поверхню, обмежену контуром; I – сила струму у контурі.

2 Основний закон електромагнітної індукції (закон Фарадея)

$$\xi_i = -N \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt},$$

де ξ_i – електрорушійна сила індукції; N – кількість витків контуру; Ψ – потокозчеплення.

Окремі випадки застосування основного закону електромагнітної індукції:

- різниця потенціалів U на кінцях провідника довжиною l , який рухається зі швидкістю v в однорідному магнітному полі,

$$U = Blv \sin \alpha,$$

де α – кут між напрямками векторів швидкості \vec{v} та магнітної індукції \vec{B} ;

- електрорушійна сила індукції ξ_i , яка виникає в рамці, що містить N витків, площею S , при обертанні рамки з кутовою швидкістю ω в однорідному магнітному полі з індукцією \vec{B}

$$\xi_i = BNS\omega \sin \omega t,$$

де ωt – миттєве значення кута між вектором \vec{B} і вектором нормалі \vec{n} до площини рамки.

3 Заряд Q , який протікає в контурі,

$$Q = \Delta\Psi/R,$$

де R – опір контуру; $\Delta\Psi$ – зміна потокозчеплення.

4 Електрорушійна сила самоіндукції ξ_i , яка виникає у замкнутому контурі при зміні сили струму в ньому,

$$\xi_i = -L \frac{dl}{dt}, \text{ або } \langle \xi_i \rangle = -L \frac{\Delta l}{\Delta t},$$

де L – індуктивність контуру.

5 Потокозчеплення контуру

$$\Psi = LI,$$

де L – індуктивність контуру.

6 Індуктивність соленоїда (тороїда):

$$L = \mu_0 \mu n^2 V,$$

де $n = \frac{N}{l}$ – кількість витків, що припадає на одиницю довжини соленоїда; V – об'єм соленоїда.

У всіх випадках для знаходження індуктивності соленоїда (тороїда) з сердечником з використанням наведеної формули для визначення магнітної проникності слід користуватися графіком залежності B від H , а потім формулою

$$\mu = B/(\mu_0 H).$$

7 Миттєве значення сили струму I в колі, що має активний опір R та індуктивність L :

$$\text{- після замикання кола } I = \frac{\xi}{r} (1 - e^{-(R/L)t}),$$

де ξ – ЕРС джерела струму; t – час, що минув після замикання кола;

$$\text{- після розмикання кола } I = I_0 e^{-(R/L)t},$$

де I_0 – значення сили струму в колі при $t = 0$; t – час, що минув з моменту розмикання кола.

Задачі для розв'язання на практичному занятті

74 (7-1) До джерела струму з ЕРС $\xi = 0,5$ В і мізерно малим внутрішнім опором приєднані два металевих стрижня, які розміщені горизонтально і паралельно один одному. Відстань l між стрижнями дорівнює 20 см. Стрижні знаходяться в однорідному магнітному

полі, напрямленому вертикально. Магнітна індукція $B = 1,5$ Тл. По стрижнях під дією сил поля ковзає зі швидкістю $v = 1$ м/с прямолінійний провідник з опором $R = 0,02$ Ом. Опором стрижнів можна знехтувати. Визначити: а) ЕРС індукції ξ ; б) силу F , яка діє на провідник з боку поля; в) силу струму I в колі; г) потужність P_1 , яка витрачається на рух провідника; д) потужність P_2 , яка витрачається на нагрівання провідника; е) потужність P_3 , яка передається в коло джерелом струму.

75 (7-2) В однорідному магнітному полі з індукцією $B = 0,4$ Тл у площині, яка перпендикулярна до ліній індукції поля, обертається стрижень довжиною $l = 10$ см. Вісь обертання проходить через один із кінців стрижня. Визначити різницю потенціалів U на кінцях стрижня при частоті обертання $n = 16$ с⁻¹.

76 (7-3) Кільце радіусом $r = 10$ см з дроту лежить на столі. Який заряд Q протече по кільцю, якщо його повернути з одного боку на інший? Опір кільця R дорівнює 1 Ом. Вертикальна складова індукції B магнітного поля Землі дорівнює 50 мкТл.

77 (7-4) Рамка із проводу опором $R = 0,01$ Ом рівномірно обертається в однорідному магнітному полі з індукцією $B = 0,05$ Тл. Вісь обертання лежить в площині рамки і перпендикулярна до ліній індукції. Площа S рамки дорівнює 100 см². Знайти, який заряд Q протече через рамку за час повороту її на кут $\alpha = 30^\circ$ в наступних трьох випадках: а) від $\alpha_0 = 0^\circ$ до $\alpha_1 = 30^\circ$; б) від α_1 до $\alpha_2 = 60^\circ$; в) від α_2 до $\alpha_3 = 90^\circ$.

78 (7-5) Котушка, яка намотана на немагнітний циліндричний каркас, має $N_1 = 750$ витків та індуктивність $L_1 = 25$ мГн. Щоб збільшити індуктивність котушки до $L_2 = 36$ мГн, обмотку з котушки зняли і замінили обмоткою з більш тонкого дроту з таким розрахунком, щоб довжина котушки залишалася такою самою. Визначити кількість N_2 витків котушки після перемотування.

79 (7-6) Джерело струму замкнули на котушку опором $R = 10$ Ом та індуктивністю $L = 1$ Гн. Через який час сила струму замикання досягне 0,9 стаціонарного значення?

Домашнє завдання

80 (7-7) В однорідному магнітному полі з індукцією $B = 0,35$ Тл рівномірно з частотою $n = 480$ хв⁻¹ обертається рамка, яка містить $N = 1500$ витків площею $S = 50$ см². Вісь обертання лежить в площині рамки і перпендикулярна до ліній індукції. Визначити максимальну ЕРС індукції ξ_{max} , яка виникає в рамці.

81 (7-8) Коротка котушка, яка містить $N = 1000$ витків, рівномірно обертається в однорідному магнітному полі з індукцією $B = 0,4$ Тл з кутовою швидкістю $\omega = 5$ рад/с відносно осі, яка збігається з діаметром котушки і перпендикулярна до ліній індукції поля. Визначити миттєве значення ЕРС індукції ξ , для тих моментів часу, в які площина котушки складає кут $\alpha = 60^\circ$ з лініями індукції поля. Площа S котушки дорівнює 100 см².

82 (7-9) У кільце з дроту, яке приєднане до балістичного гальванометра, вставили прямий магніт. По колу пройшов заряд $Q = 10$ мкКл. Визначити магнітний потік Φ , який пересікається кільцем, якщо опір R кола гальванометра дорівнює 30 Ом.

83 (7-10) Тонкий мідний дріт масою $m = 1$ г зігнутий у вигляді квадрата, кінці його замкнуті. Квадрат поміщений в однорідне магнітне поле ($B = 0,1$ Тл) так, що його площина перпендикулярна до ліній індукції поля. Визначити заряд Q , який протече по провіднику, якщо квадрат, потягнувши за протилежні вершини, витягнути в лінію.

84 (7-11) Довгий прямий соленоїд, намотаний на немагнітний каркас, має $N = 1000$ витків та індуктивність $L = 3$ мГн. Який магнітний потік Φ і яке потокозчеплення Ψ створює соленоїд при струмі силою $I = 1$ А?

85 (7-12) Коло складається із котушки індуктивністю $L = 1$ Гн і опором $R = 10$ Ом. Джерело струму можна вимикати, не розриваючи коло. Визначити час t , після проходження якого сила струму зменшиться до $0,001$ вихідного значення.

8 РУХ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК В ЕЛЕКТРОМАГНІТНОМУ ПОЛІ

Зведення основних формул розділу

Сила \vec{F} , що діє на заряд, який рухається зі швидкістю \vec{v} в магнітному полі з індукцією \vec{B} (сила Лоренца), виражається формулою

$$\vec{F} = Q[\vec{v} \times \vec{B}], \text{ або } \vec{F} = |Q| v B \sin \alpha,$$

де α – кут, який утворений вектором швидкості \vec{v} руху частинки та вектором \vec{B} індукції магнітного поля.

Задачі для розв'язання на практичному занятті

86 (8-1) Визначити радіус R дуги кола, яку описує протон в магнітному полі з індукцією $B = 15$ мТл, якщо швидкість v протону дорівнює 2 Мм/с.

87 (8-2) Протон, який пройшов прискорюючу різницю потенціалів $U = 600$ В, влетів в однорідне магнітне поле з індукцією $B = 0,3$ Тл і почав рухатися по колу. Визначити його радіус R .

88 (8-3) Заряджена частинка, яка пройшла прискорюючу різницю потенціалів $U = 2$ кВ, рухається в однорідному магнітному полі з індукцією $B = 15,1$ мТл по колу радіусом $R = 1$ см. Визначити відношення $|e|/m$ заряду частинки до її маси і швидкість v частинки.

89 (8-4) Електрон рухається в однорідному магнітному полі напруженістю $H = 16$ кА/м зі швидкістю $v = 8$ Мм/с. Вектор швидкості складає кут $\alpha = 60^\circ$ з напрямком ліній індукції поля. Визначити радіус R і крок h гвинтової лінії, по якій буде рухатися електрон в магнітному полі. Визначити також крок гвинтової лінії для електрона, який летить під малим кутом до ліній індукції.

90 (8-5) Перпендикулярно до магнітного поля з індукцією $B = 0,1$ Тл збуджено електричне поле напруженістю $E = 100$ кВ/м. Перпендикулярно до обох полів рухається, не відхиляючись від прямолінійної траєкторії, заряджена частинка. Визначити швидкість v частинки.

91 (8-6). Протон влітає зі швидкістю $v = 100$ км/с в область простору, де є електричне ($E = 210$ В/м) і магнітне ($B = 3,3$ мТл) поля. Напруженість \vec{E} електричного поля та магнітна індукція \vec{B} збігаються за напрямком. Визначити прискорення протона для

початкового моменту руху в полі, якщо напрямок вектора його швидкості \vec{v} : а) збігається з загальним напрямком векторів \vec{E} і \vec{B} ; б) перпендикулярний до цього напрямку.

Домашнє завдання

92 (8-7) Електрон рухається в магнітному полі з індукцією $B = 0,02$ Тл по колу радіусом $R = 1$ см. Визначити кінетичну енергію T електрона (в джоулях та електрон-вольтах).

93 (8-8) Заряджена частинка, яка має швидкість $v = 2 \cdot 10^6$ м/с рухається в однорідному магнітному полі з індукцією $B = 0,52$ Тл. Знайти відношення Q/m заряду частинки до її маси, якщо частинка в полі описала дугу радіусом $R = 4$ см. За цим відношенням визначити, яка це частинка?

94 (8-9) Визначити частоту n обертання електрона по коловій орбіті в магнітному полі, індукція якого B дорівнює $0,2$ Тл.

95 (8-10) Електрон рухається в однорідному магнітному полі з індукцією $B = 9$ мТл по гвинтовій лінії, радіус R якої дорівнює 1 см і крок $h = 7,8$ см. Визначити період T обертання електрона і його швидкість v .

96 (8-11) Заряджена частинка яка пройшла прискорюючу різницю потенціалів $U = 104$ В влетіла в схрещені під прямим кутом електричне ($E = 10$ кВ/м) і магнітне ($B = 0,1$ Тл) поля. Знайти відношення Q/m заряду частинки до її маси, якщо, рухаючись перпендикулярно до обох полів, частинка не притерпає відхилень від прямолінійної траєкторії.

II МОДУЛЬ

9 ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ

Зведення основних формул розділу

1 Формула Томсона. Період власних коливань в контурі без активного опору

$$T = 2\pi\sqrt{LC},$$

де L – індуктивність контуру; C – його електроємність.

2 Зв'язок довжини електромагнітної хвилі з періодом T і частотою ν коливань:

$$\lambda = cT, \text{ або } \lambda = \frac{c}{\nu},$$

де c – швидкість електромагнітних хвиль в вакуумі ($c=3 \cdot 10^8$ м/с).

3 Швидкість електромагнітних хвиль в середовищі

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}},$$

де ϵ – діелектрична проникність; μ – магнітна проникність середовища.

Задачі для розв'язання на практичному занятті

97 (9-1) Котушка індуктивністю $L = 1$ мГн і повітряний конденсатор, який складається з двох круглих пластин діаметром $D = 20$ см кожна, з'єднані паралельно. Відстань d між пластинами дорівнює 1 см. Визначити період T коливань.

98 (9-2) Коливальний контур має індуктивність $L = 1,6$ мГн, електроємність $C = 0,04$ мкФ і максимальна напруга U_{max} на клеммах, яка дорівнює 200 В. Визначити максимальну силу струму I_{max} в контурі. Опором контуру знехтувати.

99 (9-3) Котушка (без сердечника) довжиною $l = 50$ см і площею S_1 перерізу, яка дорівнює 3 см^2 , має $N = 1000$ витків і з'єднана паралельно з конденсатором. Конденсатор складається із двох пластин площею $S_2 = 75 \text{ см}^2$ кожна. Відстань d між пластинами дорівнює 5 мм. Діелектрик – повітря. Визначити період T коливань.

100 (9-4) Індуктивність L коливального контуру дорівнює $0,5$ мГн. Яка повинна бути електроємність C контуру, щоб він резонував на довжину хвилі $\lambda = 300$ м?

101 (9-5) Для демонстрації дослідів Герца із заломленням електромагнітних хвиль іноді беруть велику призму, виготовлену з парафіну. Визначити показник заломлення парафіну, якщо його діелектрична проникність $\varepsilon = 2$ і магнітна проникність $\mu = 1$.

102 (9-6) Два паралельних провідника, які занурені в гліцерин, індуктивно з'єднані з генератором електромагнітних коливань частотою $\nu = 420$ МГц. Відстань l між пучностями стоячих хвиль на провідниках дорівнює 7 см. Знайти діелектричну проникність ε гліцерину. Магнітну проникність μ середовища прийняти за одиницю.

Домашнє завдання

103 (9-7) Конденсатор електроємністю $C = 500$ пФ, з'єднаний паралельно з котушкою довжиною $l = 40$ см і площею перерізу S , яка дорівнює 5 см^2 . Котушка має $N = 1000$ витків. Сердечник немагнітний. Знайти період T коливань.

104 (9-8) Коливальний контур має конденсатор електроємністю $C = 8$ пФ і котушку індуктивністю $L = 0,5$ мГн. Яка максимальна напруга U_{max} на обкладках конденсатора, якщо максимальна сила струму $I_{max} = 40$ мА?

105 (9-9) На яку довжину хвилі λ буде резонувати контур, який складається із котушки індуктивністю $L = 4$ мкГн і конденсатора електроємністю $C = 1,11$ нФ?

10 ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ СВІТЛА

Зведення основних формул розділу

1 Швидкість світла в середовищі

$$v = c/n,$$

де c – швидкість електромагнітних хвиль у вакуумі;
 n – абсолютний показник заломлення середовища.

2 Оптична довжина шляху світлової хвилі

$$L = nl,$$

де l – геометрична довжина шляху світлової хвилі в середовищі з показником заломлення n .

3 Оптична різниця ходу двох світлових хвиль

$$\Delta = L_1 - L_2.$$

4 Оптична різниця ходу світлових хвиль, які відбиті від верхньої та нижньої поверхні тонкої плоскопаралельної пластинки або плівки, яка міститься в повітрі (рис. 14 б),

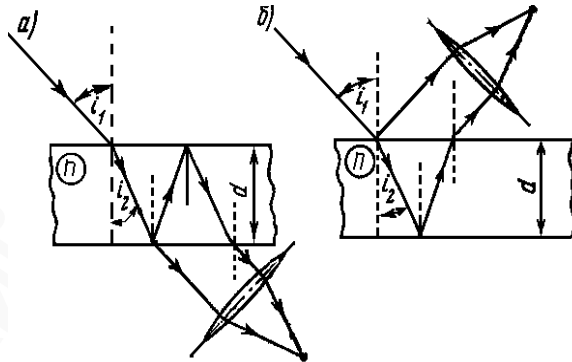


Рисунок 14

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i_1} + \lambda/2, \text{ або } \Delta = 2dn \cos i_2 + \lambda/2,$$

де d – товщина пластинки (плівки); i_1 – кут падіння; i_2 – кут заломлення.

Другий доданок у цих формулах враховує зміну оптичної довжини шляху світлової хвилі на $\lambda/2$ при відбитті її від більш оптично щільного середовища.

Якщо відбиття відбувається від середовища з меншою оптичною щільністю, то оптичний шлях хвилі не змінюється.

5 Зв'язок різниці фаз $\Delta\varphi$ коливань з оптичною різницею ходу світлових хвиль

$$\Delta\varphi = 2\pi\Delta/\lambda.$$

6 Умова спостереження максимумів інтенсивності світла при інтерференції

$$\Delta = \pm k\lambda \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots).$$

7 Умова спостереження мінімумів інтенсивності світла при інтерференції

$$\Delta = \pm(2k + 1)(\lambda/2).$$

8 Радіуси світлих кілець Ньютона у відбитому світлі (або темних у прохідному)

$$r_k = \sqrt{(2k - 1)R(\lambda/2)},$$

де k – номер кільця ($k = 1, 2, 3, \dots$); R – радіус кривини поверхні лінзи, яка торкається плоскопаралельної скляної пластинки.

Радіуси темних кілець у відбитому світлі (або світлих у прохідному)

$$r_h = \sqrt{kR\lambda}.$$

Задачі для розв'язання на практичному занятті

106 (10-1) Якої довжини l_1 шлях пройде фронт хвилі монохроматичного світла у вакуумі за той самий час, за який він проходить шлях $l_2 = 1$ м у воді?

107 (10-2) Відстань d між двома щілинами в досліді Юнга дорівнює 1 мм, відстань l від щілин до екрана дорівнює 3 м. Визначити довжину хвилі λ , яка випромінюється джерелом монохроматичного світла, якщо ширина b смуг інтерференції на екрані дорівнює 1,5 мм.

108 (10-3) На мильну плівку ($n = 1,3$), яка міститься в повітрі, падає нормально пучок променів білого світла. При якій найменшій товщині d плівки відбите світло з довжиною хвилі $\lambda = 0,55$ мкм буде максимально посиленим у результаті інтерференції?

109 (10-4) Відстань $\Delta r_{2,1}$ між другим і першим темними кільцями Ньютона у відбитому світлі дорівнює 1 мм. Визначити відстань $\Delta r_{10,9}$ між десятим та дев'ятим кільцями.

110 (10-5) За допомогою установки для спостереження кілець Ньютона був виміряний у відбитому світлі радіус третього темного кільця ($k = 3$). Коли простір між плоскопаралельною пластинкою і лінзою заповнили рідиною, тоді той самий радіус стало мати кільце з номером, на одиницю більшим. Визначити показник заломлення n рідини.

111 (10-6) На екрані спостерігається інтерференційна картина від двох когерентних джерел світла з довжиною хвилі $\lambda = 480$ нм. Коли на шляху одного з пучків розмістили тонку пластинку із плавленого кварцу з показником заломлення $n = 1,46$, інтерференційна картина змістилася на $m = 69$ смуг. Визначити товщину d кварцової пластинки.

Домашнє завдання

112 (10-7) У досліді Юнга відстань d між щілинами дорівнює 0,8 мм. На якій відстані l від щілин потрібно розмістити екран, щоб ширина b інтерференційної смуги була 2 мм?

113 (10-8) Пучок монохроматичних ($\lambda = 0,6$ мкм) світлових хвиль падає під кутом $i = 30^\circ$ на мильну плівку, яка міститься у повітрі ($n = 1,3$). При якій найменшій товщині d плівки відбиті світлові хвилі

будуть максимально ослаблені та максимально посилені інтерференцією?

114 (10-9) Плоско-вопукла лінза вопуклою стороною лежить на скляній пластинці. Визначити товщину h шару повітря там, де у відбитому світлі ($\lambda = 0,6$ мкм) можна побачити перше світле кільце Ньютона.

115 (10-10) Між скляною пластинкою і плоско вопуклою скляною лінзою, що лежить на ній, налита рідина, показник заломлення якої менший ніж показник заломлення скла. Радіус r_8 восьмого темного кільця Ньютона при спостереженні у відбитому світлі ($\lambda = 700$ нм) дорівнює 2 мм. Радіус R кривини вопуклої поверхні лінзи дорівнює 1 мм. Знайти показник заломлення n рідини.

116 (10-11) Визначити переміщення дзеркала в інтерферометрі Майкельсона, якщо інтерференційна картина змістилася на $m = 100$ смуг. Дослід проводився зі світлом з довжиною хвилі $\lambda = 546$ нм.

11 ДИФРАКЦІЯ СВІТЛА

Зведення основних формул розділу

1 Радіус k -ї зони Френеля:

$$\text{- для сферичної хвилі } \rho_k = \sqrt{\frac{ab}{a+b}} k \lambda,$$

де a – відстань діафрагми з круглим отвором від точкового джерела світла, b – відстань діафрагми від екрана, на якому ведеться спостереження дифракційної картини; k – номер зони Френеля; λ – довжина хвилі;

$$\text{- для плоскої хвилі } \rho_k = \sqrt{bk\lambda}.$$

2 Дифракція світла на одній щілині при нормальному падінні променів. Умова спостереження мінімумів інтенсивності світла

$$a \sin \varphi = \pm 2k \frac{\lambda}{2} = \pm k \lambda : k = 1, 2, 3, \dots,$$

де a – ширина щілини; φ – кут дифракції; k – номер мінімуму; λ – довжина хвилі.

Умова спостереження максимумів інтенсивності світла

$$a \sin \varphi' = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} : k = 1, 2, 3, \dots,$$

де φ' – наближене значенням кута дифракції.

3 Дифракція світла на дифракційній ґратці при нормальному падінні променів.

Умова спостереження головних максимумів інтенсивності світла

$$d \sin \varphi = \pm k \lambda : k = 0, 1, 2, 3, \dots,$$

де d – період (стала) ґратки; k – номер головного максимуму; φ – кут між нормаллю до поверхні ґратки і напрямком дифрагованих хвиль.

4 Розрізняюча сила дифракційної ґратки

$$R = \frac{\lambda}{\Delta \lambda} = kN,$$

де $\Delta \lambda$ – найменша різниця довжин хвиль двох сусідніх спектральних ліній (λ і $\lambda + \Delta \lambda$), при якій ці лінії можна побачити в спектрі, отриманому за допомогою цієї ґратки окремо; N – кількість штрихів ґратки; k – порядковий номер дифракційного максимуму.

5 Кутова дисперсія дифракційної ґратки

$$D_{\varphi} = \frac{\delta \varphi}{\delta \lambda} = \frac{k}{d \cos \varphi},$$

лінійна дисперсія дифракційної ґратки

$$D_l = \frac{\delta l}{\delta \lambda}.$$

Для малих кутів дифракції

$$D_1 \approx D_\varphi \approx f \frac{k}{d},$$

де f – головна фокусна відстань лінзи, що збирає на екрані хвилі, що дифрагують.

6 Розрізняюча сила об'єктива телескопа

$$R = \frac{1}{\beta} = \frac{D}{1,22\lambda},$$

де β – найменша кутова відстань між двома світлими точками, при якій зображення цих точок у фокальній площині об'єктива можна побачити окремо; D – діаметр об'єктива; λ – довжина хвилі.

7 Формула Вульфа-Брегга

$$2d \sin \vartheta = k\lambda,$$

де d – відстань між атомними площинами кристала; ϑ – кут ковзання (кут між напрямом пучка паралельних рентгенівських випромінювань, які падають на кристал, і гранню кристала), який визначає напрям, в якому має місце дзеркальне відбиття випромінювання (дифракційний максимум).

Задачі для розв'язання на практичному занятті

117 (11-1) На діафрагму з круглим отвором діаметром $d = 4$ мм падає нормально паралельний пучок променів монохроматичного світла ($\lambda = 0,5$ мкм). Точка спостереження розміщена на осі отвору на відстані $b = 1$ м від нього. Скільки зон Френеля вміщується в отворі? Темна чи світла пляма буде в центрі дифракційної картини, якщо в місці спостереження розмістити екран?

118 (11-2) Розміщення точкового джерела S світла ($\lambda = 0,5$ мкм), плоскої діафрагми з круглим отвором радіусом $r = 1$ мм і екрана показано на рис. 15 ($a = 1$ м). Визначити відстань b від екрана до діафрагми, при якому отвір відкривав би для точки P три зони Френеля.

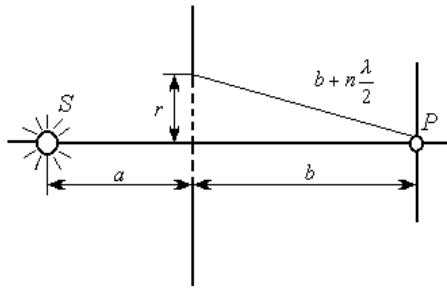


Рисунок 15

119 (11-3) Дифракційна ґратка освітлена нормально падаючим монохроматичним світлом. У дифракційній картині максимум другого порядку відхилений на кут $\varphi_1 = 14^\circ$. На який кут φ_2 відхилений максимум третього порядку?

120 (11-4) Дифракційна ґратка містить $n = 200$ штрихів на 1 мм. На ґратку падає нормально монохроматичне світло ($\lambda = 0,6$ мкм). Максимум якого найбільшого порядку дає ця ґратка?

121 (11-5) Яку найменшу розрізняючу силу R повинна мати дифракційна ґратка, щоб з її допомогою можна було розрізнити дві спектральні лінії калію ($\lambda_1 = 578$ нм і $\lambda_2 = 580$ нм)? Яку найменшу кількість N штрихів повинна мати ця ґратка, щоб розрізнення було можливим у спектрі другого порядку?

122 (11-6) Паралельний пучок рентгенівського випромінювання падає на грань кристала. Під кутом $\vartheta = 65^\circ$ до площини грані спостерігається максимум першого порядку. Відстань d між атомними площинами кристала 280 пм. Визначити довжину хвилі λ рентгенівського випромінювання.

Домашнє завдання

123 (11-7) Плоска світлова хвиля ($\lambda = 0,5$ мкм) падає нормально на діафрагму з круглим отвором діаметром $d = 1$ см. На якій відстані b від отвору повинна міститись точка спостереження, щоб отвір відкривав: а) одну зону Френзеля; б) дві зони Френзеля?

124 (11-8) Плоска світлова хвиля ($\lambda = 0,7$ мкм) падає нормально на діафрагму з круглим отвором радіусом $r = 1,4$ мм. Визначити відстані b_1, b_2, b_3 від діафрагми до трьох найбільш віддалених від неї точок, в яких спостерігаються мінімуми інтенсивності.

125 (11-9) На дифракційну решітку, яка містить $n = 400$ штрихів на 1 мм, падає нормально монохроматичне світло ($\lambda = 0,6$ мкм). Знайти загальну кількість дифракційних максимумів, які дає ця ґратка. Визначити кут φ дифракції, який відповідає останньому максимуму.

126 (11-10) За допомогою дифракційної ґратки з періодом $d = 20$ мкм потрібно дозволити дублет натрію ($\lambda_1 = 589,0$ нм і $\lambda_2 = 589,6$ нм) в спектрі другого порядку. При якій найменшій довжині l ґратки це можливо?

127 (11-11) Яка довжина хвилі λ монохроматичного рентгенівського випромінювання, яке падає на кристал кальциту, якщо дифракційний максимум першого порядку спостерігається, коли кут \mathcal{G} між напрямками падаючого випромінювання і гранню кристала дорівнює 3° ? Відстань d між атомними площинами кристала взята за $0,3$ нм.

12. ПОЛЯРИЗАЦІЯ І ДИСПЕРСІЯ СВІТЛА

Зведення основних формул розділу

1 Закон Брюстера

$$\operatorname{tg} i_B = n_{21},$$

де i_B – кут падіння, при якому відбита світлова хвиля повністю поляризована; n_{21} – відносний показник заломлення.

2 Закон Малюса

$$I = I_0 \cos^2 \alpha,$$

де I – інтенсивність плоскополяризованого світла, яке пройшло через аналізатор; I_0 – інтенсивність плоскополяризованого світла, яке падає на аналізатор; α – кут між напрямком коливань світлового вектора хвилі, яка падає на аналізатор, і площиною пропускання аналізатора.

3 Ступінь поляризації світла

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

де I_{\max} і I_{\min} – максимальна і мінімальна інтенсивності частково-поляризованого світла, яке пропускається аналізатором.

4 Кут повороту φ площини поляризації оптично активними речовинами визначається співвідношеннями:

- у твердих тілах $\varphi = \alpha d$,

де α – стала обертання; d – довжина шляху, який пройшло світло в оптично-активній речовині;

- у чистих рідинах $\varphi = [\alpha] \rho d$,

де $[\alpha]$ – питоме обертання; ρ – густина рідини;

- у розчинах $\varphi = [\alpha] C d$,

де C – масова концентрація оптично активної речовини в розчині.

Задачі для розв'язання на практичному занятті

128 (12-1) Пучок природного світла, яке розповсюджується у воді, відбивається від грані алмаза, зануреного в воду. При якому куті падіння i_B відбите світло повністю поляризоване?

129 (12-2) У скільки разів послаблюється інтенсивність світла, яке проходить через два ніколі, площі пропускання яких утворюють кут $\alpha = 30^\circ$, якщо в кожному з ніколів окремо губиться 10% інтенсивності падаючого на нього світла?

130 (12-3) у частково поляризованому світлі амплітуда світлового вектора, яка відповідає максимальній інтенсивності світла, в $n = 2$ рази більше амплітуди, яка відповідає мінімальній інтенсивності. Визначити ступінь поляризації P світла.

131 (12-4) На ніколь падає пучок частково поляризованого світла. При деякому положенні ніколя інтенсивність світла, що пройшло через нього, стала максимальною. Коли площину пропускання ніколя повернули на кут $\beta = 45^\circ$, інтенсивність світла збільшилася в $k = 1,5$ рази. Визначити ступінь поляризації P світла.

132 (12-5) Пластинку кварцу товщиною $d = 2$ мм, вирізану перпендикулярно оптичній осі, розмістили між паралельними ніколями, внаслідок чого площина поляризації світла повернулася на кут $\varphi = 53^\circ$. Визначити товщину h пластинки, при якій дане монохроматичне світло не проходить через аналізатор.

133 (12-6) Розчин глюкози з масовою концентрацією $C_1 = 280$ кг/м³, який міститься в скляній трубці, повертає площину поляризації монохроматичного світла, що проходить через цей розчин, на кут $\varphi_1 = 32^\circ$. Визначити масову концентрацією C_2 глюкози в іншому розчині, налитому в трубку тієї самої довжини, якщо він повертає площину поляризації на кут $\varphi_2 = 24^\circ$.

Домашнє завдання

134 (12-7) Кут Брюстера i_B при падінні світла із повітря на кристал кам'яної солі дорівнює 57° . Визначити швидкість світла в цьому кристалі.

135 (12-8) Кут α між площинами пропускання поляризатора та аналізатора дорівнює 45° . У скільки разів зменшиться інтенсивність світла, який виходить з аналізатора, якщо кут збільшити до 60° ?

136 (12-9) Ступінь поляризації P частково поляризованого світла дорівнює 0,5. У скільки разів відрізняється максимальна інтенсивність світла, яке пропускається через аналізатор від мінімальної?

137 (12-10) Нікотин (чиста рідина), який міститься в скляній трубці довжиною $l = 8$ см, повертає площину поляризації жовтого світла натрію на кут $\varphi = 137^\circ$. Густина нікотину $\rho = 1,01 \cdot 10^3$ кг/м³. Визначити питоме обертання $[\alpha]$ нікотину.

13. ТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ

Зведення основних формул розділу

1 Закон Стефана-Больцмана

$$R = \sigma T^4,$$

де R – енергетична світність абсолютно чорного тіла;
 T – термодинамічна температура; σ – стала Стефана-Больцмана [$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴)].

2 Енергетична світність сірого тіла

$$R = a_T \sigma T^4,$$

де a_T – коефіцієнт чорноти (коефіцієнт випромінювання) сірого тіла.

3 Закон зміщення Віна

$$\lambda_m = \frac{b}{T},$$

де λ_m – довжина хвилі, на яку припадає максимум енергії випромінювання; b – стала закону зміщення Віна ($b = 2,90 \cdot 10^{-3}$ м·К).

4 Формула Планка

$$r_{\lambda,T} = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1},$$

$$r_{\omega,T} = \frac{h \omega^3}{4\pi^2 c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\omega}{k T}} - 1},$$

де $r_{\lambda,T}$, $r_{\omega,T}$ – випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла;
 λ – довжина хвилі; ω – кругова частота; c – швидкість світла у вакуумі; k – стала Больцмана; T – термодинамічна температура;

h – стала Планка; $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ – стала Планка, розділена на 2π .

5 Залежність максимальної випромінювальної здатності від температури

$$(r_{\lambda,T})_{\max} = C T^5,$$

де C – стала [$C = 1,30 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м³·К⁵)].

Задачі для розв'язання на практичному занятті

138 (13-1) У скільки разів потрібно збільшити термодинамічну температуру абсолютно чорного тіла, щоб його енергетична світність R збільшилася в два рази?

139 (13-2) З поверхні сажі площею $S = 2 \text{ см}^2$ при температурі $T = 400 \text{ К}$ за час $t = 5 \text{ хв}$ випромінюється енергія $W = 83 \text{ Дж}$. Визначити коефіцієнт чорноти a_T сажі.

140 (13-3) Можна умовно прийняти, що Земля випромінює як сіре тіло, яке знаходиться при температурі $T = 280 \text{ К}$. Визначити коефіцієнт чорноти a_T Землі, якщо енергетична світність R її поверхні дорівнює $325 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$.

141 (13-4) Визначити температуру T абсолютно чорного тіла, при якій максимум випромінювальної здатності $(r_{\lambda,T})_{\max}$ припадає на червону границю видимого спектра ($\lambda_1 = 750 \text{ нм}$); на фіолетову ($\lambda_2 = 380 \text{ нм}$).

142 (13-5) Внаслідок зміни температури абсолютно чорного тіла максимум випромінювальної здатності $(r_{\lambda,T})_{\max}$ змістився з $\lambda_1 = 2,4 \text{ мкм}$ на $\lambda_2 = 0,8 \text{ мкм}$. Як і у скільки разів змінилися енергетична світність R тіла і максимальна випромінювальна здібність?

143 (13-6) Температура T абсолютно чорного тіла дорівнює 2 кК . Визначити: а) випромінювальну здатність $r_{\lambda,T}$ для довжини хвилі $\lambda = 600 \text{ нм}$; б) енергетичну світність R в інтервалі довжин хвиль від $\lambda_1 = 590 \text{ нм}$ на $\lambda_2 = 610 \text{ нм}$. Припустити, що середня випромінювальна здатність тіла в цьому інтервалі дорівнює значенню, яке було знайдено для довжини хвилі $\lambda = 600 \text{ нм}$.

Домашнє завдання

144 (13-7) Визначити відносне збільшення $\frac{\Delta R}{R}$ енергетичної світності абсолютно чорного тіла при збільшенні його температури на 1%.

145 (13-8) Беручи коефіцієнт чорноти a_T вугілля при температурі $T = 600 \text{ К}$ за $0,8$, визначити: а) енергетичну світність R вугілля; б) енергію W , яка випромінюється з поверхні вугілля площею $S = 5 \text{ см}^2$ за час $t = 10 \text{ хв}$.

146 (13-9) Муфельна піч використовує потужність $P = 1$ кВт. Температура T її внутрішньої поверхні при відкритому отворі площею $S = 25 \text{ см}^2$ дорівнює $1,2 \text{ кК}$. Вважаючи, що отвір печи випромінює як абсолютно чорне тіло, визначити, яка частина ε потужності розсіюється стінками.

147 (13-10) Потужність P випромінювання кулі радіусом $R = 10 \text{ см}$ при деякій сталій температурі T дорівнює 1 кВт . Знайти цю температуру, вважаючи кулю сірим тілом з коефіцієнтом чорноти $a_T = 0,25$.

148 (13-11) Температура T верхніх шарів Сонця дорівнює $5,3 \text{ кК}$. Вважаючи Сонце абсолютно чорним тілом, визначити довжину хвилі λ_m , яка відповідає максимальній випромінювальній здатності $(r_{\lambda,T})_{\max}$ Сонця.

149 (13-12) При збільшенні термодинамічної температури T абсолютно чорного тіла в два рази довжина хвилі λ_m , на яку припадає максимум спектральної випромінювальної здатності $(r_{\lambda,T})_{\max}$, зменшилась на $\Delta\lambda = 400 \text{ нм}$. Визначити початкову і кінцеві температури T_1 і T_2 .

14 ФОТОНИ. ФОТОЕФЕКТ І ЕФЕКТ КОМПТОНА

Зведення основних формул розділу

1 Формула Ейнштейна в загальному випадку

$$\varepsilon = h\nu = A + T_{\max}, \text{ або } \hbar\omega = A + T_{\max},$$

де $\varepsilon = h\nu = \hbar\omega$ - енергія фотона, який падає на поверхню металу; A - робота виходу електрона із металу; T_{\max} - максимальна кінетична енергія фотоелектрона;

у випадку якщо енергія фотона значно більше роботи виходу ($h\nu \gg A$),

$$h\nu = T_{\max}, \text{ або } \hbar\omega = T_{\max}.$$

2 Максимальна кінетична енергія фотоелектрона в двох випадках (нерелятивістському і релятивістському) виражається різними формулами:

а) якщо фотоефект викликаний фотоном, який має незначну енергію ($h\nu = \hbar\omega < 5 \text{ кеВ}$), то

$$T_{\max} = \frac{1}{2} m_0 v_{\max}^2,$$

де m_0 – маса спокою електронка;

б) якщо фотоефект викликаний фотоном, який має велику енергію ($h\nu = \hbar\omega \gg 5 \text{ кеВ}$), то

$$T_{\max} = (m - m_0)c^2, \text{ або } T_{\max} = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right),$$

де $\beta = v_{\max}/c$; m – маса релятивістського електрона;

3 Червона границя фотоефекту

$$\lambda_0 = \frac{hc}{A}, \text{ або } \lambda_0 = \frac{2\pi\hbar c}{A}; \nu_0 = \frac{A}{h}, \text{ або } \omega_0 = \frac{A}{\hbar},$$

де λ_0 – максимальна довжина хвилі випромінювань (ν_0 та ω_0 – мінімальні відповідно частота і колова частота), при яких ще можливий фотоефект.

4 Тиск, який створює світло при нормальному падінні,

$$p = \frac{E_e}{c} (1 + \rho), \text{ або } p = \omega (1 + \rho),$$

де E_e – опромінення поверхні; c – швидкість електромагнітного випромінювання у вакуумі; ω – обємна густина енергії випромінювання; ρ – коефіцієнт відбиття.

5 Енергія фотона

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \text{ або } \varepsilon = \hbar\omega.$$

6 Маса й імпульс фотона виражаються відповідними формулами

$$m = \frac{\varepsilon}{c^2} = \frac{h}{c\lambda} \quad \text{і} \quad p = mc = \frac{h}{\lambda}.$$

7 Зміна довжини хвилі $\Delta\lambda$ фотона при розсіянні його на електроні на кут θ

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{2\pi\hbar}{mc}(1 - \cos\theta), \quad \text{або} \quad \Delta\lambda = 2\frac{2\pi\hbar}{mc} \sin^2 \frac{\theta}{2},$$

де m – маса електрона віддачі; λ і λ' – довжини хвиль.

8 Комптонівська довжина хвилі

$$\lambda_C = \frac{2\pi\hbar}{mc}.$$

(При розсіянні фотона на електроні $\lambda_C = 2,436$ пм).

Задачі для розв'язання на практичному занятті

150 (14-1) Визначити роботу виходу A електронів із натрію, якщо червона границя фотоелектру $\lambda_0 = 500$ нм.

151 (14-2) Для припинення фотоелектру, який викликаний опромінюванням ультрафіолетовим світлом платинової пластинки, потрібно прикласти затримуючу різницю потенціалів $U_1 = 3,7$ В. Якщо платинову пластинку замінити іншою пластинкою, затримуючу напругу потрібно буде збільшити до 6 В. Визначити роботу виходу A електронів з поверхні цієї пластинки.

152 (14-3) Визначити довжину хвилі λ ультрафіолетового випромінювання, яке падає на поверхню деякого металу, при максимальній швидкості фотоелектронів, яка дорівнює 10 Мм/с. Роботою виходу електронів з металу знехтувати.

153 (14-4) Визначити довжину хвилі λ , масу m та імпульс p фотона з енергією $\varepsilon = 1$ МеВ. Порівняти масу цього фотона з масою електрона, що перебуває у стані спокою.

154 (14-5) Визначити довжину хвилі λ фотона, маса якого дорівнює масі спокою: а) електрону; б) протону.

155 (14-6) Визначити максимальну зміну довжини хвилі при комптонівському розсіянні: а) на вільних електронах; б) на вільних протонах.

156 (14-7) Визначити імпульс p електрона віддачі при ефекті Комптона, якщо фотон з енергією, яка дорівнює енергії спокою електрона, був розсіяний на кут $\theta = 180^\circ$.

Домашнє завдання

157 (14-8) Чи буде спостерігатися фотоефект, якщо на поверхню срібла направити ультрафіолетове випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 300$ нм?

158 (14-9) На поверхню літію падає монохроматичне світло ($\lambda = 310$ нм). Щоб припинити емісію електронів, потрібно прикласти затримуючу різницю потенціалів U не менше 1,7 В. Визначити роботу виходу A .

159 (14-10) На цинкову пластинку падає монохроматичне світло з довжиною хвилі $\lambda = 220$ нм. Визначити максимальну швидкість v_{max} фотоелектронів.

160 (14-11) Визначити максимальну швидкість v_{max} фотоелектронів, які вибиваються із металу під дією γ – випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 0,3$ нм.

161 (14-12) Визначити енергію ε , масу m та імпульс p фотона, якому відповідає довжина хвилі $\lambda = 380$ нм (фіолетова границя видимого спектра).

162 (14-13) Визначити довжину хвилі λ фотона, імпульс якого дорівнює імпульсу електрона, який має швидкість $v = 10$ Мм/с.

163 (14-14). Визначити кут θ розсіяння фотона, який зазнав співудару з вільним електроном, якщо зміна довжини хвилі $\Delta\lambda$ при розсіянні дорівнює 3,62 пм.

164 (14-15). Яка частина енергії фотону при ефекті Комптона припадає на електрон віддачі, якщо електрон зазнав розсіяння на кут $\theta = 180^\circ$? Енергія ε фотону до розсіяння дорівнює 0,255 МеВ.

ВІДПОВІДІ ДО ЗАДАЧ

$$1 \quad Q = 4l \sin \frac{\alpha}{2} \sqrt{\pi \epsilon_0 g m \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} = 50,1 \text{ нКл}. \quad 2 \quad Q_1 = Q \frac{\sqrt{3}}{3} = -0,577 \text{ нКл};$$

не буде стійким. $3 \quad F = \frac{Q\tau}{2\pi\epsilon_0 R} = 3,6 \text{ мН}. \quad 4 \quad 64,3 \text{ кВ/м}. \quad 5 \quad 1 \text{ кВ}.$

$$6 \quad 33,6 \text{ В}. \quad 7 \quad \epsilon = \frac{\rho}{\rho - \rho_0} = 2. \quad 8 \quad Q_1 = -\frac{1}{2}(\sqrt{2} + \frac{1}{2})Q = -0,287 \text{ нКл}.$$

$$9 \text{ а) } F_1 = \frac{QQ_1 a}{4\pi\epsilon_0(R^2 + l_1^2)^{3/2}} = 0,16 \text{ мН}; \quad \text{б) } F_2 = \frac{QQ_1}{4\pi\epsilon_0 l_2^2} = 2,25 \text{ мкН}.$$

$$10 \quad E_1 = 0; \quad E_2 = \frac{R\sigma}{\epsilon_0 r_2} = 75,5 \text{ В/м}; \quad \text{див. графік на рис.1.}$$

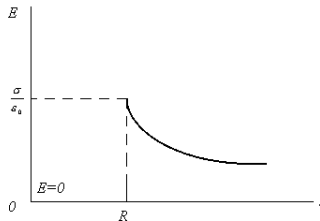


Рисунок 1

$$11 \quad \Phi_E = \frac{\pi\sigma r^2}{2\epsilon_0} = 1,78 \text{ кВ} \cdot \text{м}. \quad 12 \quad \Delta\varphi = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_1} = 125 \text{ В}. \quad 13 \quad 432 \text{ В}. \quad 14$$

$$A_{1,2} = \frac{2}{3} Q_1 \varphi_1 = 2 \text{ мкДж}. \quad 15 \quad A_{1,2} = \frac{Q\tau}{2\epsilon_0} \left(\sqrt{1 - \frac{1}{\sqrt{2}}} \right) = 165 \text{ мкДж}.$$

$$16 \quad 6,75 \text{ кВ/м}. \quad 17 \quad F = \frac{3p_1 p_2}{2\pi\epsilon_0 r^4} = 1,35 \text{ мкН}. \quad 18 \quad A = 2pE = 30 \text{ мкДж}.$$

$$19 \text{ а) } \varphi = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 R} = 360 \text{ В}; \quad \text{б) } \varphi = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 R^2} (\sqrt{R^2 + a^2} - a) = 149 \text{ В}.$$

$$20 \quad A_{1,2} = \sqrt{\frac{QQ_1}{8\pi\epsilon_0 a}} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) = 659 \text{ мкДж}.$$

21 $A_{1,2} = \frac{Q\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln 2 = 62,4 \text{ мкДж}$. **22.** $E_A = 1,08 \text{ кВ/м}$; $\varphi_A = 0$; $E_B = 22$

кВ/м ; $\varphi_B = 386 \text{ В}$. **23.** $\Pi = \frac{p_1 p_2}{2\pi\epsilon_0 r^3} = 18 \text{ нДж}$. **24.**

$\Delta\Pi = pE(1 - \cos \alpha) = 0,5 \text{ мкДж}$. **25.** $\sigma_1 = 49,8 \text{ нКл/м}^2$; $\sigma_2 = 16,6$

нКл/м^2 . **26.** $\Delta U = \frac{\sigma}{\epsilon_0} (d_2 - d_1) = 22,6 \text{ В}$. **27.** $2,5 \text{ мкФ}$. **28.**

$C_2 = \frac{U - U_1}{U_2 - U_1} C_1 = 0,32 \text{ мкФ}$. **29.** $2,32 \text{ мм}$. **30.**

$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} + \frac{C_3 C_4}{C_3 + C_4} = 20 \text{ нФ}$. **31.** $\varphi = \frac{R_1 \varphi_1 + R_2 \varphi_2}{R_1 + R_2} = 380 \text{ В}$. **32.** 700

В . **33.** $\Delta Q = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} (U_1 - U_2) = 36 \text{ мкКл}$. **34.** 200 мкКл ; 120 мкКл ; 120

мкКл ; 100 мкКл ; 110 В ; 60 В ; 40 В ; 220 мкКл ; 210 В . **35.** 2 пФ .

Вказівка: довести що якщо $C_1/C_2 = C_3/C_4$, то $\varphi_A = \varphi_B$, і тому ємність C_5 при визначенні загальної ємності схеми значення не має. **36.**

$\Pi = \frac{Q^2}{2\pi\epsilon_0 a} \left(2 + \frac{1}{\sqrt{2}} \right) = 48,8 \text{ мкДж}$. **37.** $0,209 \text{ Дж}$. **38.** 50 мкДж . **39.**

$A = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{\epsilon_0} \left(\frac{\epsilon - 1}{\epsilon} \right) \left(\frac{2\epsilon - 1}{\epsilon} \right) V = 63,5 \text{ нДж}$. **40.** 30 мкДж . **41.**

$W_1 = \frac{2\pi}{45} \frac{\rho^2}{\epsilon\epsilon_0} R^5 = 7,88 \text{ нДж}$; $W_2 = \frac{2\pi}{9} \frac{\rho^2}{\epsilon_0} R^5 = 78,8 \text{ нДж}$. **42.**

$\Pi = \frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0 a} \sqrt{2} = 12,7 \text{ мкДж}$. **43.** 30 мкДж ; 15 нН . **44.** 1500 В ; $0,2$

мДж . **45.** 80 мкДж . **46.** $W = \frac{q^2}{16\pi\epsilon\epsilon_0 R} = 225 \text{ мкДж}$. **47.** $2,58 \text{ мОм}$. **48.**

$2,9 \text{ Ом}$, $4,5 \text{ Ом}$. **49.** $6,4 \text{ А}$; $5,8 \text{ А}$; $0,6 \text{ А}$. **50.** $0,5 \text{ Ом}$; 2 Вт . **51.**

$q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3Q\tau}{R}} = 20 \text{ Кл}$. **52.** $0,1 \text{ В/м}$. **53.** $6,1 \text{ МА/м}^2$. **54.** 2 А . **55.** $0,5 \text{ А}$.

56. 0,4; 297 Ом. **57.** 45 хВ, 10 хВ. **58.** $\frac{dl}{dt} = \frac{1}{\tau} \sqrt{\frac{3Q}{R\tau}} = 1 \text{ А/с}$. **59.** 15,4

А/м. **60.** 50 мкТл. **61.** $\frac{8\sqrt{2}}{\pi^2} = 1,15$. **62.**

$$F_1 = F_2 = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi a} = 20 \text{ мН}; F_3 = \frac{\sqrt{3}\mu_0 I^2}{2\pi a} = 34,6 \text{ мН}. \text{ **63. 1)}**$$

$$p_m = \frac{Ql^2 \omega}{24} = 4 \text{ нА} \cdot \text{м}^2; 2) \frac{p_m}{L} = \frac{Q}{2m} = 10 \text{ мкКл/кг}. \text{ **64. 1)}**$$

$$p_m = \pi q n R^2 = 3,14 \text{ нА} \cdot \text{м}^2; 2) 500 \text{ нКл/кг}. \text{ **65. а)}**$$
 $\oint B_i dl = 0;$

$$\text{б)}$$
 $\oint B_i dl = \frac{\mu_0 NI}{l} = 25,2 \text{ мТл} \cdot \text{м}. \text{ **66. 0,52 мВб. 67.}**$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2r^3} R^2 = 62,8 \text{ мкТл}. \text{ **68. 40 мкТл. 69. 275 А/м; 250 А/м. 70.}**$$

$$F = \frac{2\mu_0 I^2 a}{\pi d} = 8 \text{ мН}. \text{ **71. 1) 62,8 нА} \cdot \text{м}^2; 2) 1 \text{ мкКл/кг}. \text{ **72.}****$$

$$\oint B_i dl = \mu_0 \sum_{i=1}^3 I_i = 6,28 \text{ мТл} \cdot \text{м}. \text{ **73. 1) 1 Тл, } 2,5 \cdot 10^3; 2) 1,4 \text{ Тл, 700. 74.}**$$

$$1) 0,3 \text{ В}; 2) 3 \text{ Н}; 3) 10 \text{ А}; 4) 3 \text{ Вт}; 5) 2 \text{ Вт}; 6) 5 \text{ Вт}. \text{ **75.}**$$

$$U = \pi^2 B n = 201 \text{ мВ}. \text{ **76. 3,14 мкКл. 77. } Q = \frac{\Delta \Phi}{R}; 1)**$$

$$Q = BS(1 - \cos \alpha_1)/R = 6,27 \text{ мКл}; 2)$$

$$Q = BS(\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)/R = 18 \text{ мКл}; 3)$$

$$Q = BS(\cos \alpha_2 - \cos \alpha_3)/R = 25 \text{ мКл}. \text{ **78. 90. 79. 0,23 с. 80.}**$$

$$\xi_{\max} = 2\pi n N B S = 132 \text{ В}. \text{ **81. } \xi_i = \omega B N S \cos \alpha = 1 \text{ В}. \text{ **82. 0,3 мВб. 83.}****$$

$$Q = \frac{mB}{16\rho D} = 41,4 \text{ мкКл} \text{ (} D \text{ – густина міді)}. \text{ **84. 3 мкВб; 3 мВб. 85. 0,69}**$$

$$\text{с. **86. 1,38 м. 87. 12 мм. 88. 175 ГКл/кг; 26,5 Мм/с. 89. 1,96 мм; 7,1}**$$

$$\text{мм; 14,2 мм. **90. } v = \frac{E}{B} = 1 \text{ Мм/с}. \text{ **91. 1) } a = |e|E/m = 20,1 \text{ Гм/с}^2; 2)****$$

$$a = \sqrt{(eE/m)^2 + (Bev/m)^2} = 37,5 \text{ Гм/с}^2. \text{ **-92.}**$$

$$T = \frac{B^2 r^2 e^2}{2m} = 0,563 \text{ фДж (3,52 кеВ)}, \text{ де } m - \text{ маса електрону. } \mathbf{93.}$$

$$\frac{Q}{m} = \frac{e}{m} = \frac{v}{RB} = 96,3 \text{ МКл/кг}; \text{ протон та антипротон. } \mathbf{8-94.}$$

$$n = \frac{B|e|}{2\pi m} = 562 \text{ МГц}, \text{ де } m - \text{ маса електрону. } \mathbf{95. 3,97 \text{ нс}; 25 \text{ Мм/с. } \mathbf{96.}}$$

$$\frac{e}{m} = \frac{E^2}{2UB^2} = 48 \text{ МКл/кг. } \mathbf{97. } T = \pi d \sqrt{\frac{\pi \varepsilon_0 L}{d}} = 33,2 \text{ нс. } \mathbf{98. 1 \text{ А. } \mathbf{99. 628}}$$

$$\text{нс. } \mathbf{100. 51 \text{ пФ. } \mathbf{101. 1,4. } \mathbf{102. 28. } \mathbf{103. } T = 2\pi N \sqrt{\frac{\mu_0 SC}{l}} = 5,57 \text{ мкс.}$$

$$\mathbf{104. } U_{\max} = I_{\max} \sqrt{L/C} = 317 \text{ В. } \mathbf{105. 126 \text{ м. } \mathbf{106. 1,33 \text{ мм. } \mathbf{107. 500 \text{ нм.}}$$

$$\mathbf{108. 0,1 \text{ мкм. } \mathbf{109. 0,39 \text{ мм. } \mathbf{110. } n = (k+1)/k = 1,33. \mathbf{111.}}$$

$$d = \frac{m\lambda}{n-1} = 72 \text{ мкм. } \mathbf{112. } l = db/\lambda = 2,5 \text{ м. } \mathbf{113. 0,25 \text{ мкм}; 0,125 \text{ мкм.}}$$

$$\mathbf{114. 0,15 \text{ мкм. } \mathbf{115. 1,4. } \mathbf{116. 27,3 \text{ мкм. } \mathbf{117. 8 \text{ зон, темна пляма. } \mathbf{118.}}$$

$$b = \frac{ar^2}{ak\lambda - r^2} = 2 \text{ м. } \mathbf{119. 21^\circ 17'. } \mathbf{120. 8. } \mathbf{120. } R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 290;$$

$$N = \frac{R}{k} = 145. \mathbf{121. 506 \text{ пм. } \mathbf{122. 1) 50 \text{ м}; 2) 25 \text{ м. } \mathbf{123. } b_1 = 1,4 \text{ м}; b_2 =$$

$$0,7 \text{ м}; b_3 = 0,47 \text{ м. } \mathbf{124. 8; 74^\circ. } \mathbf{125. } l = \frac{\lambda d}{k\delta\lambda} = 10 \text{ мм. } \mathbf{126. 31 \text{ пм. } \mathbf{127.}}$$

$$\mathbf{128. 61^\circ 12'. } \mathbf{129. \text{ У } 3,3 \text{ рази. } \mathbf{130. 0,33. } \mathbf{131. 0,348. } \mathbf{132. 3,4 \text{ мм. } \mathbf{133.}}$$

$$0,21 \text{ г/см}^3. \mathbf{134. 194 \text{ Мм/с. } \mathbf{135. \text{ У } 2 \text{ рази. } \mathbf{136. \text{ У } 3 \text{ рази. } \mathbf{137. 169}}$$

$$\text{град}\cdot\text{см}^3/\text{дм}\cdot\text{г. } \mathbf{138. \text{ У } 1,19 \text{ рази. } \mathbf{140. 0,953. } \mathbf{141. } a_T = \frac{R}{\sigma T^4} = 0,26. \mathbf{142. 3,8}$$

$$\text{кК. } \mathbf{143. \text{ Збільшилися в } 81 \text{ та } 243 \text{ рази. } \mathbf{144. 1) 30 \text{ МВт}/(\text{м}^2\cdot\text{мм}); 2) 600}$$

$$\text{Вт}/\text{м}^2. \mathbf{144. 4\%. } \mathbf{145. } R_e = a_T \sigma T^4 = 5,88 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$W = R_e ST = 1,76 \text{ кДж. } \mathbf{146. } \eta = 1 - \frac{\sigma T^4 S}{P} = 0,71. \mathbf{147.}$$

$$T = \left(\frac{P}{4\pi a_T R^2 \sigma} \right)^{\frac{1}{4}} = 866 \text{ К. } \mathbf{148. 547 \text{ нм. } \mathbf{149. 3,62 \text{ кК}; 7,24 \text{ кК. } \mathbf{150.}}$$

2,49 еВ. **151.** 4 еВ. **152.** 4,36 нм. **153.** 1,24 пм. **154.** 1) 2,49 пм; 2) 1,32 фм. **155.** 1) 4,84 пм; 2) 2,64 фм. **156.** $3,6 \cdot 10^{-22}$ кг·м/с. **157).** Не буде, так як енергія фотону (41 еВ) менше роботи виходу (4,7 еВ). **158.** 2,3 еВ. **160.** 760 км/с. **161.** Електрон релятивіський; $\beta = 0,83$; $v = \beta c = 249$ Мм/с. **162.** 3,27 еВ; $5,8 \cdot 10^{-36}$ кг; $1,74 \cdot 10^{-27}$ кг·м/с. **163.** 73 пм. **164.** 120° або 240° . **165.** 0,5.