МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-енергетичний факультет

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

Фізика.

Модуль 4 «Електростатика. Постійний електричний струм»,
методичні рекомендації для виконання практичних робіт здобувачами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти ОПП «Комп'ютерні науки» спеціальності 122 «Комп'ютерні науки»

Миколаїв
2024

УДК 531.19
Ф48

Рекомендовано до друку науково-методичною комісією інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету від 26.03.2024, протокол № 7

Укладачі:

Вахоніна Лариса – канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

Рецензенти:

Грубань Василь – канд. тех. наук доцент кафедри тракторів та сільськогосподарського виробництва, Миколаївський національний аграрний університет.

Ставинський Андрій – д-р техн. наук, професор, зав. кафедрою електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

© Миколаївський національний аграрний університет, 2024

Зміст **стор**

Вступ..... 4

Загальні методичні рекомендації до розв'язування задач і виконання контрольних робіт…… 6

Навчальний матеріал з розділу курсу фізики..... 7

1.Електростатика. Постійний електричний струм..... 7

1.1.Основні формули..... 7

1.2.Приклади розв'язування задач..... 13

1.3.Задачі для самостійного розв'язування..... 38

1.4.Приклади тестових питань для захисту теоретичної частини змісту модуля……... 40

1.5.Контрольна робота №3..... 50

2.Додатки..... 65

Література..... 68

ВСТУП

У процесі занять студенти вчаться застосовувати набуті теоретичні знання. Вивчення теорії на прикладах, взятих із життя і досягнень науки та техніки, чітка організація практичних знань, високі вимоги до студентів сприяють вихованню якостей, які повинен мати майбутній спеціаліст.

Студент має ґрунтовно опрацьовувати відповідний лекційний матеріал, визначати незрозумілі питання для з'ясування під час занять та виконувати домашнє завдання.

Для засвоєння матеріалу, розширення та поглиблення знань, з'ясування функціональної залежності фізичних величин, встановлення зв'язку теорії з практикою, розвитку самостійного мислення і навичок самостійної роботи - розв'язування задач має першорядне значення. Отже, для розв'язування задач недостатньо формального знання фізичних законів. Для цього необхідне вміння міркувати, аналітично мислити, знаходити спеціальні методи розв’язування задач.

Перед тим, як виконувати самостійне завдання, студент повинен вивчити відповідний лекційний матеріал за літературою, рекомендованою викладачем, зрозуміти задачі, розв'язані до теми заняття, відповісти на запитання, поставлені до даної теми.

Задачі рекомендується розв'язувати у такій послідовності:

а) ознайомлення з умовою задачі та її конкретний запис;

б) аналіз задачі;

в) розв’язування задачі;

г) перевірка найменування одиниць виміру фізичних величин;

д) обчислення потрібної величини;

є) аналіз одержаного результату.

У методичних рекомендаціях наведено теоретичний матеріал з розділу "Електростатика. Постійний електричний струм "., що читається згідно з навчальним планом. Задачі підібрано так, щоб вони стосувалися основних питань курсу і щоб їх було достатньо для розв'язування під час занять в аудиторії та вдома. Для виконання самостійного завдання використовують окремі задачі.

Для заданого викладачем номера варіанта студент використовує таблицю варіантів.

Усі величини в задачах мають бути виражені за Міжнародною системою одиниць.(СІ)

Фізичні величини функціонально зв'язані між собою, а тому нераціонально для всіх величин довільно встановлювати одиниці вимірювання. У науці та техніці довільно прийнято одиниці лише для кількох величин, що називаються основними. Для решти величин одиниці виміру встановлені на основі формул, що зв'язують дану величину з величинами, для яких встановлено основні одиниці: ці нові одиниці називаються похідними. Сукупність основних і похідних одиниць виміру фізичних одиниць становлять систему одиниць.

Передбачено ряд задач для самостійного розв'язування , а також питання для самоперевірки теоретичної частини з курсу електростатики.

У контрольних роботах для студентів денної форми навчання передбачено чотири задачі. Використовуючи таблицю варіантів, студент визначає за номером варіанта відповідні номери задач.

Загальні методичні рекомендації до розв'язку задач і виконання контрольних робіт

1. Розв'язування задач варто супроводжувати короткими, але вичерпними поясненнями; у разі, коли це можливо, дати малюнок, виконаний креслярським способом.

2. Розв'язувати задачу потрібно в загальному вигляді, тобто виразити шукану величину в літерних позначеннях величин, заданих в умові задачі. При такому способі розв'язування не виконуються обчислення проміжних величин.

3. Після одержання розрахункової формули для перевірки правильності, її варто підставити в праву частину формули замість символів позначення одиниць цих величин, провести з ними необхідні дії і переконатися в тому, що отримана при цьому одиниця вимірювання відповідає шуканій величині. Якщо такої відповідності немає, то це означає, що задачу розв'язано невірно.

4. Числові значення величин при підстановці їх у розрахункову формулу варто виражати тільки в одиницях СІ. Як виняток допускається виражати в будь-яких, але однакових одиницях, числові значення однорідних величин, що перебувають у чисельнику і знаменнику та мають однаковий ступінь.

5. При підстановці в розрахункову формулу, а також у відповіді числові значення величин варто записувати як добуток десяткового дробу з однією значущою цифрою перед комою на відповідну ступінь десяти.

Наприклад, замість 3520 треба записати $3{,}52 \cdot 10^3$, замість 0,00129 записати $1{,}29 \cdot 10^{-3}$ і т.п.

6. Обчислення за розрахунковою формулою слід проводити з дотриманням правил наближених обчислень. Остаточну відповідь варто записувати з трьома значущими цифрами. Це стосується і випадку, коли результат отримано з використанням калькулятора.

НАВЧАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ З РОЗДІЛУ КУРСУ ФІЗИКИ

1. ЕЛЕКТРОСТАТИКА. ПОСТІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

1.1. Основні формули

Закон Кулона

$$F = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4\pi\varepsilon_0 \varepsilon r^2},$$

де F — сила взаємодії точкових зарядів Q_1 Q_2;

r–відстань між зарядами; ε– проникливість; ε_0 – електрична постійна.

Напруженість електричного поля і потенціал

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

де П—потенційна енергія точкового додатного заряду Q, який є в даній точці поля (за умови, що потенційна енергія заряду, віддаленого в нескінченність, дорівнює нулю).

Сила, яка діє на точковий заряд, що є в електричному полі, і потенційна енергія цього заряду

$$F = QE, \ \Pi = Q\varphi,$$

Напруженість і потенціал поля, створеного системою точкових зарядів (принцип суперпозиції електричних полів),

$$E = \sum_{i=1}^{N} E_i, \quad \varphi = \sum_{i=1}^{N} \varphi_i,$$

де E, φ; — напруженість і потенціал у даній точці поля, створеного *i*-м зарядом.

Напруженість і потенціал поля, створеного точковим зарядом,

$$E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2}, \quad \varphi = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r},$$

де r – відстань від заряду Q до точки, у якій визначається напруженість і потенціал.

Напруженість і потенціал поля, створені провідною зарядженою сферою радіусом R на відстані r від центра сфери:

а). $E = 0; \quad \varphi = \dfrac{Q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon R}$ (при *r*-R)

б) $E = \dfrac{Q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon R^2}; \quad \varphi = \dfrac{Q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon R}$ (при *r*-R)

с) $E = \dfrac{Q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2}; \quad \varphi = \dfrac{Q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r}$,(при *r*-R)

де Q — заряд сфери.

Лінійна густина заряду

$$\tau = Q / l.$$

Поверхнева густина заряду

$$\sigma = Q / S.$$

Напруженість і потенціал поля, створеного розподіленими зарядами. Якщо заряд рівномірно розподілений уздовж лінії з лінійною густиною, τ то на лінії виділяється мала ділянка довжиною dl із зарядом $dQ = \tau dl$, і такий заряд можна розглядати як точковий та використовувати формули:

$$dE = \frac{\tau dl}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2}\frac{r}{r}; \quad d\varphi = \frac{\tau dl}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r},$$

де r – радіус-вектор, спрямований від виділеного елемента dl до точки, в якій визначається напруженість.

Використовуючи принцип суперпозиції електричних полів знаходимо інтегруванням напруженість E і потенціал φ поля, створеного розподіленим зарядом:

$$E = \frac{\tau}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\int_l \frac{dl}{r^2}\frac{r}{r}; \qquad E = \frac{\tau}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\int_l \frac{dl}{r}.$$

Інтегрування ведеться вздовж усієї довжини l зарядженої лінії (див. приклади 5 і 8).

Напруженість поля, утвореного нескінченою прямою рівномірно зарядженою лінією чи нескінченно довгим циліндром,

$$E = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon r},$$

де r – відстань від прямої чи осі циліндра до точки, в якій визначається напруженість поля.

Напруженість поля, утвореного нескінченно рівномірно зарядженою площиною,

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0\varepsilon}.$$

Зв’язок між потенціалом і напруженістю:

а) $E = -grad\varphi,$ чи $E = -\left(i\frac{\partial\varphi}{\partial x} + j\frac{\partial\varphi}{\partial y} + k\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right)$ в загальному випадку;

б) $E = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{d}$ у випадку однорідного поля;

в) $E = -\frac{d\varphi}{dr}$ у випадку поля, яке має центральну чи осьову симетрію.

Електричний момент диполя

$$p = |q|\, l\ ,$$

де l – плече диполя (векторна величина, що спрямована від від'ємного заряду до додатного і чисельно дорівнює відстані між зарядами), q – заряд.

Робота сил електричного поля переміщення заряду q з точки поля з потенціалом φ_1 у точку з потенціалом φ_2

$$A_{12} = q(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Електроємність

$$C = q/\varphi \text{ чи } C = q/U,$$

де -φ потенціал провідника (при умові, що у нескінченності потенціал провідника дорівнює нулю); U - різниця потенціалів пластин конденсатора.

Електроємність плоского конденсатора

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \cdot S/d\ ,$$

де S - площа пластини (однієї) конденсатора; d - відстань між пластинами.

Електроємність батареї конденсаторів:

а) $\dfrac{1}{C} = \sum\limits_{i=1}^{N} \dfrac{1}{C_i}$ при послідовному з'єднані;

б) $C = \sum\limits_{i=1}^{N} C_i\ ,$

де N – кількість конденсаторів у батареї.

Енергія зарядженого конденсатора:

$$W = qU/2, \quad W = CU^2/2, \quad W = q^2/(2C).$$

Сила постійного струму:

$$I = q / t,$$

де q – заряд, що пройшов через поперечний перетин провідника за час t.

Густина постійного струму:

$$j = I / S,$$

де S – площа поперечного перетину провідника.

Зв'язок густини струму з середньою швидкістю **-υ;**

$$j = qn < \upsilon >,$$

де q – заряд частинки; n – концентрація заряджених частинок.

Закон Ома:

а) $I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} = \frac{U}{R}$ для ділянки кола в якому немає ЕРС, де - $\varphi_1 - \varphi_2 = U$ - різниця потенціалів (напруга) на кінцях ділянок ланцюга; R – опір ділянки;

б) $I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) \pm \varepsilon}{R}$ для ділянки кола, що має ЕРС; де ε - ЕРС джерела струму; R — повний опір ділянки (сума зовнішніх і внутрішніх опорів);

в) $I = \frac{\varepsilon}{R + R_i}$ для замкнутого (повного) ланцюга, де R - зовнішній опір ланцюга; R_i - внутрішній опір ланцюга.

Закони Кірхгофа:

а) $\sum I_i = 0$ - перший закон;

б) $\sum I_i R_i = \sum \varepsilon_i$ - другий закон,

де $\sum I_i$ - алгебраїчна сума сил струмів, що сходяться у вузлі; $\sum I_i R_i$ - алгебраїчна сума добутків сил струмів на опори ділянок; $\sum \varepsilon_i$

алгебраїчна сума ЕРС.

Опір R і провідність G провідника

$$R = \rho \frac{l}{s}, \quad G = \gamma S / l,$$

де ρ - питомий опір; γ - питома провідність; l - довжина провідника; S - площа поперечного переріза провідника.

Опір системи провідників:

а) $R = \sum R_i$ при послідовному з'єднанні;

б) $\frac{1}{R} = \sum \frac{1}{R_i}$ при паралельному з'єднанні;

де R_i - опір i-го провідника.

Робота струму:

$$A = IUt, \quad A = I^2 Rt, \quad A = U^2 t / R;$$

Перша формула справедлива для будь-якої ділянки ланцюга, на кінцях якого підтримується напруга U, останні дві - для ділянки, що не містить ЕРС.

Потужність струму:

$$P = UI, \quad P = I^2 R, \quad P = U^2 / R.$$

Закон Джоуля— Ленца

$$Q = I^2 Rt.$$

Закон Ома в диференціальній формі:

$$j = \gamma E,$$

де γ - питома провідність; E - напруженість електричного поля; j - густина струму.

Зв'язок питомої провідності γ з рухливістю b заряджених часток (іонів)

$$\gamma = qn(b_+ + b_-),$$

де q - заряд іона; n - концентрація іонів; b_+ *і* b_- - рухливості позитивних і негативних іонів.

1.2 Приклади розв'язання задач

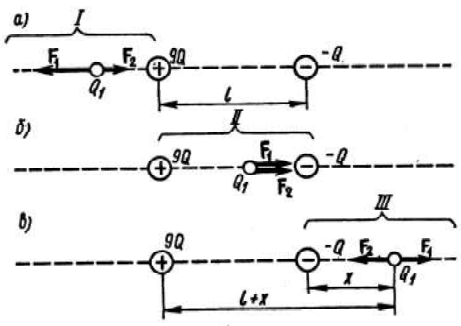

Рис.1(а,б,в)

Приклад 1. Два точкових заряди 9q і – q закріплені на відстані *l*=50 см один від одного. Третій заряд q_1 може переміщатися лише вздовж прямої, що проходить через заряди. Визначити положення заряду q_1 при якому він буде знаходитися в рівновазі. При якому знаку заряду q_1 рівновага буде стійкою.

Розв'язок . Заряд q_1 перебуває в рівновазі в тому випадку, коли геометрична сума сил, що діють на нього, дорівнює нулю. Це значить, що на заряд q_1 повинні діяти дві сили, рівні за модулем і протилежні за напрямком. Розглянемо, на якій з трьох ділянок I, II, III (рис. 1) може бути виконана ця умова. Для визначеності будемо вважати, що заряд q_1 - позитивний.

На ділянці I (рис.. 1а) на заряд q_1 будуть діяти дві протилежно спрямовані сили: F_1 і F_2. Сила F_1, що діє з боку заряду 9q, у будь-якій точці цієї ділянки більше сили F_2, що діє з боку заряду - q, тому що більший заряд 9q завжди є ближчим до заряду q_1, чим менший (по модулю) заряд - q. Тому рівновага на цій ділянці неможлива.

На ділянці II (рис. 1,б) обидві сили F_1 і F_2 спрямовані в одну сторону - до заряду - q. Отже, і на другій ділянці рівновага неможлива.

На ділянці III (рис. 1, в) сили F_1 і F_2 спрямовані в протилежні сторони, так само як і на ділянці I, але на відміну від нього менший заряд - q завжди є ближчим до заряду q_1, чим більший заряд 9q. Це значить, що можна знайти таку точку на прямій, де сили F_1 і F_2 будуть однакові за модулем, тобто

$$F_1 = F_2 \tag{1}$$

Нехай x і $l + x$ - відстань від меншого і більшого зарядів до заряду q_1. Виражаючи в рівності (1) F_1 і F_2 відповідно до закону Кулона, одержимо

$$\frac{9q \cdot q_1}{(l+x)^2} = \frac{q \cdot q_1}{x^2} \quad , \quad \text{чи} \quad l + x = \pm 3x \quad \text{звідки} \quad x_1 = \frac{+l}{2}, x_2 = \frac{-l}{4}.$$

Корінь x^2 не задовольняє фізичній умові задачі (у цій точці сили F_1 і F_2 хоча і рівні за модулем, але мають однаковий напрямок).

Визначимо знак заряду q_1, за якого рівновага буде стійкою. Рівновага називається стійкою, якщо при зсуві заряду від положення рівноваги виникають сили, що повертають його в положення рівноваги. Розглянемо зсув заряду q_1у двох випадках: коли заряд позитивний і негативний.

Якщо заряд q_1 позитивний, то при зсуві його вліво обидві сили F_1 і F_2 зростають. Через те, що сила F_1 зростає повільніше, то результуюча сила, що діє на заряд q_1, буде спрямована в ту ж сторону, в яку зміщений цей заряд, тобто вліво. Під дією цієї сили заряд q_1 буде віддалятися від положення рівноваги. Те ж відбувається і при зсуві заряду q_1 вправо. Сила F_2 убуває швидше, ніж F_1. Геометрична сума сил у цьому випадку спрямована вправо. Заряд під дією цієї сили також буде переміщатися вправо, тобто віддалятися від положення рівноваги.

Таким чином, у випадку позитивного заряду рівновага є хиткою.

Якщо заряд q_1 негативний, то його зсув уліво викликає збільшення сил F_1 і F_2, але сила F_1 зростає повільніше, ніж F_2, тобто $|F_2|;|F_1|$. Результуюча сила буде спрямована вправо. Під її дією заряд q_1 повертається до положення рівноваги. При зсуві q_1вправо сила F_2 убуває швидше, ніж F_1, тобто $|F_1|;|F_2|$, результуюча сила спрямована вліво і заряд q_1 знову буде повертатися до положення рівноваги. За негативного заряду рівновага є стійкою. Величина самого заряду q_1 несуттєва.

Приклад 2. Три точкових заряди **$Q=Q_2=Q_3=1$** нКл розташовані у вершинах рівностороннього трикутника. Який заряд **Q_4** потрібно помістити в центрі трикутника, щоб зазначена система зарядів знаходилася в рівновазі?

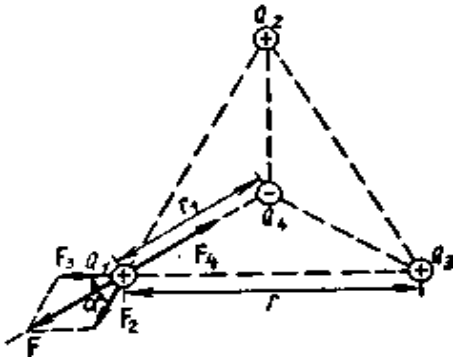

Рис.2

Розв'язок. Усі три заряди, розташовані по вершинах трикутника, знаходяться в однакових умовах. Тому досить з'ясувати, який заряд варто помістити в центрі трикутника, щоб який-небудь один із трьох зарядів, наприклад **Q_1**, знаходився в рівновазі. Заряд **Q_1** буде знаходитися в рівновазі, якщо векторна сума діючих на нього сил дорівнює нулю (рис.2).

$$F_2 + F_3 + F_4 = F + F_4 = 0, \qquad (1)$$

де F_2, F_3, F_4 - сили, з якими відповідно діють на заряд Q_1 заряди Q_2, Q_3, Q_4; F - рівнодіючих сил F_2 і F_3.

Тому що сили F і F_4 спрямовані по одній прямій у протилежні сторони, та векторна рівність (1) можна замінити скалярним: $F - F_4 = 0$,

звідки F_4=F. Виразивши в останній рівності F через F_2 і F_3 і з огляду на те, що F_3=F_2, одержимо

$$F_4 = F_2\sqrt{2(1+\cos\alpha)}.$$

Застосувавши закон Кулона і маючи на увазі, що Q_2=Q_3=Q_1, знайдемо

$$\frac{Q_1 Q_4}{4\pi\varepsilon_0 r_1^2} = \frac{Q_1^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\sqrt{2(1+\cos\alpha)},$$

звідки

$$Q_4 = \frac{Q_1 r_1^2}{r^2}\sqrt{2(1+\cos\alpha)}. \qquad (2)$$

З геометричних побудов у рівносторонньому трикутнику виходить, що

$$r_1 = \frac{r/2}{\cos(\alpha/2)} = \frac{r}{2\cos 30^\circ} = \frac{r}{\sqrt{3}}; \quad \cos\alpha = \cos 60^\circ = 1/2.$$

З урахуванням цього формула (2) набирає вигляду $Q_4 = Q_1/\sqrt{3}$.

Зробимо обчислення:

$$Q_4 = \frac{10^{-9}}{\sqrt{3}Кл} = 5{,}77\cdot 10^{-10}\,Кл = 0{,}577 нКл$$

Слід зазначити, що рівновага системи зарядів буде хиткою.

Приклад 3. На тонкому стержні довжиною *l*=20см знаходиться є розподілений електричний заряд. На продовженні осі стержня на відстані *a*=10см від найближчого кінця є точковий заряд Q_1=40нКл, що взаємодіє зі стержнем із силою F=6мкН. Визначити лінійну густину τ заряду на стержень.

Розв'язок. Сила взаємодії F зарядженого стержня з точковим зарядом Q_1 залежить від лінійної густини τ заряду на стержень. Знаючи цю залежність, можна визначити τ. За обчислення сили F варто мати на

увазі, що заряд на стержні не є точковим, тому закон Кулона безпосередньо застосувати не можна. У цьому разі можна використати такий спосіб. Виділимо зі стержня (рис. 3) малу ділянку *dr* із зарядом $dQ=\tau dr$. Цей заряд можна розглядати як точковий. Тоді, відповідно до закону Кулона,

$$dF = \frac{Q_1 \tau dr}{4\pi\varepsilon_0 r^2}.$$

Інтегруючи цей вираз у межах від *a* до *a*+*l*, одержуємо

$$F = \frac{Q_1 \tau}{4\pi\varepsilon_0} \int_a^{a+l} \frac{dr}{r^2} = \frac{Q_1 \tau}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{a+l}\right) = \frac{Q_1 \tau l}{4\pi\varepsilon_0 a(a+l)},$$

Звідки

$$\tau = \frac{4\pi\varepsilon_0 a(a+l)F}{Q_1 l}.$$

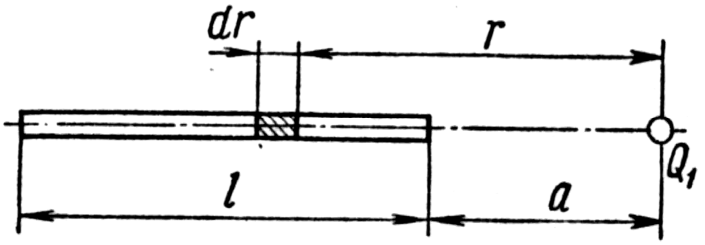

Рис.3

Перевіримо, чи дає розрахункова формула одиницю лінійної густини електричного заряду. Для цього в праву частину формули замість символів величин підставимо їхні одиниці:

$$\frac{[\varepsilon_0][a][a+l][F]}{[Q][l]} = \frac{1ф/м \cdot 1м \cdot 1м \cdot 1Н}{1Кл \cdot 1м} = \frac{1ф \cdot 1Н}{1Кл} = \frac{1Кл/В \cdot 1Н}{1Кл} = \frac{1Н}{1В} =$$
$$= 1Н/(1Дж/1Кл) = (1Н \cdot 1Кл)/1Н \cdot м = 1Кл/1м$$

Знайдена одиниця є одиницею лінійної густини заряду.

Зробимо обчислення:

$$\tau = \frac{0{,}1(0{,}1+0{,}2)\quad 6\cdot\times\quad 10^{\ 6}}{9\times 10^{9}\times\quad 4\quad \times 10^{\ 8}\times\quad 0{,}2} = 2{,}5\times 10^{\ 9} = 2{,}5\,\text{нКл/м}$$

Приклад 4. Два точкових електричних заряди Q_1=1 нКл і Q_2=-2 нКл перебувають у повітрі на відстані *d*=10см один від одного. Визначити напруженість E і потенціал φ поля, створеного цими зарядами в точці A, яка перебуває від заряду Q_1 на відстані r_1=9 см і від заряду Q_2 на r_2=7 см.

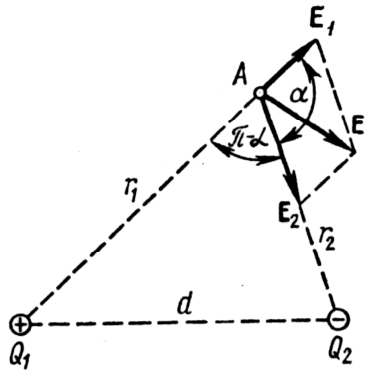

Рис.4

Розв'язок. Відповідно до принципу суперпозиції електричних полів, кожен заряд створює поле незалежне від присутності в просторі інших зарядів. Тому напруженість E електричного поля в шуканій точці може бути знайдена як геометрична сума напруженостей E_1 і E_2 полів, утворених кожним зарядом окремо: $E=E_1+E_2$**.** Напруженості електричного поля, утвореного в повітрі (ε=1) зарядами Q_1 і Q_2,

$$E_1 = \frac{|Q_1|}{4\pi\varepsilon_0 r_1^2}, \tag{1}$$

$$E_2 = \frac{|Q_2|}{4\pi\varepsilon_0 r_2^2}. \tag{2}$$

Вектор E_1 спрямований по силовій лінії від заряду Q_1, тому що цей заряд позитивний; вектор E_2 спрямований також по силовій лінії, але до заряду Q_2, тому що цей заряд негативний.

Модуль вектора E знайдемо за теоремою косинусів:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2\cos\alpha}, \tag{3}$$

де α - кут між векторами E_1 і E_2, що може бути знайдений із

трикутника зі сторонами r_1, r_2 і d:

$$\cos\alpha = \frac{d^2 - r_1^2 - r_2^2}{2r_1r_2}.$$

У даному разі, щоб уникнути громіздких записів, зручніше значення $cos\alpha$ обчислити окремо:

$$\cos\alpha = \frac{(0{,}1)^2 - (0{,}09)^2 - (0{,}07)^2}{2 \cdot 0{,}09 \cdot 0{,}07} = -0{,}238.$$

Підставляючи вираз E_1 з (1) і E_2 з (2) у (3) і виносячи загальний множник $1/(4\pi\varepsilon_0)$ за знак кореня, отримаємо

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\sqrt{\frac{Q_1^2}{r_1^4} + \frac{Q_2^2}{r_2^4} + 2\frac{|Q_1||Q_2|}{r_1^2 r_2^2}\cos\alpha}. \qquad (4)$$

Відповідно до принципу суперпозиції електричних полів потенціал φ результуючого поля, утвореного двома зарядами Q_1 і Q_2, дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 \qquad (5)$$

Потенціал електричного поля, утвореного у вакуумі точковим зарядом Q на відстані r від нього, виражається формулою:

$$\varphi = \frac{Q}{2\pi\varepsilon_0 r}. \qquad (6)$$

У нашому випадку відповідно до формул (5) і (6) одержимо:

$$\varphi = \frac{Q_1}{4\pi\varepsilon_0 r_1} + \frac{Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r_2} \quad \text{чи} \quad \varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{Q_1}{r_1} + \frac{Q_2}{r_2}\right).$$

Зробимо обчислення:

$$E = \frac{1}{4\pi/\left(4\pi \quad 9 \quad 10^9\right)} = \sqrt{\frac{\left(10^{\ 9}\right)^2}{(0{,}09)^4} + \frac{\left(2 \quad 10^{\ 9}\right)^2}{(0{,}07)^4} + 2\frac{10^{\ 9} \cdot \ 2 \ \cdot 10^{\ 9}}{(0{,}09)^2 \cdot \ (0{,}07)^2}\left(\ 0{,}238\right)} \text{ В}/м =$$

$$= 3{,}85 \cdot \ 10^3 \text{ В}/м = 3{,}58 \text{ кВ}/м;$$

$$\varphi = \frac{1}{4\pi/\left(4\pi \cdot \ 9 \cdot \ 10^9\right)} \left(\frac{10^{\ 9}}{0{,}09} + \frac{2 \cdot \ 10^{\ 9}}{0{,}07}\right) \text{В} = \ 157\text{В}.$$

Приклад 5. По тонкому кільцю рівномірно розподілений заряд Q=40нКл із лінійною густиною τ=50 нКл/м. Визначити напруженість E електричного поля, утвореного цим зарядом у точці A, що лежить на осі кільця і віддаленої від його центра на відстань, рівну половині радіуса.

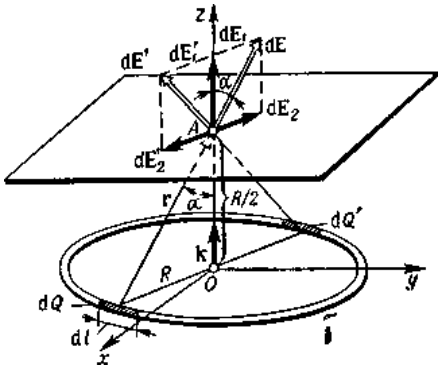

Рис.5

Розв'язок. З'єднаємо координатну площину *x*O*y* з площиною кільця, а вісь O*z* - з віссю кільця (рис. 5). На кільці виділимо малу ділянку довжиною d*l***.** Тому що заряд dQ=τd*l*, який перебуває на цій ділянці, можна вважати точковим, то напруженість dE електричного поля, утвореного цим зарядом, може бути записана у вигляді

$$dE = \frac{\tau dl}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \cdot \frac{r}{r},$$

де *r* - радіус-вектор, спрямований від елемента d*l* до точки A.

Розкладемо вектор dE на дві складові: dE_1, перпендикулярно площині кільця (що збігається з віссю O*z*), і dE_2, паралельну площині кільця (площини *x*O*y*) , тобто

$$dE = dE_1 + dE_2.$$

Напруженість E електричного поля в точці A знайдемо інтегруванням:

$$E = \int_L E_1 + \int_L E_2,$$

де інтегрування ведеться по всіх елементах зарядженого кільця. Помітимо, що для кожної пари зарядів dQ і dQ' ($dQ=dQ'$), розташованих симетрично навколо центра кільця, вектори dE_2 і dE_2' у точці А рівні за модулем і протилежні за напрямком: $dE_2=-dE_2'$.Тому векторна сума (інтеграл) $\int_L dE_2 = 0$. Складові dE_1 для всіх елементів кільця мають спільний напрямок з віссю Oz (одиничним вектором k), тобто $dE_1= kdE_1$.

Тоді

$$E = k\int_L dE_1.$$

Тому, що

$dE = \dfrac{\tau dl}{4\pi\varepsilon_0 r^2}, \quad r = \sqrt{R^2 + (R/2)^2} = \sqrt{5}\,R/2, \quad \cos\alpha = (R/2)/r = 1/\sqrt{5},$ то

$$dE_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{4\tau}{5R^2\sqrt{5}}dl = \frac{\tau dl}{5\sqrt{5}\pi\varepsilon_0 R^2}.$$

Таким чином:

$$E = k\int_0^{2\pi R}\frac{\tau dl}{5\sqrt{5}\pi\varepsilon_0 R^2} = k\cdot\frac{2\tau}{5\sqrt{5}\varepsilon_0 R}.$$

Зі співвідношення $Q = 2\pi R\tau$ визначимо радіус кільця: $R = Q/2\pi\tau$.

Тоді

$$E = k\cdot\frac{2\tau 2\pi\tau}{5\sqrt{5}\varepsilon_0 Q} = k\cdot\frac{4\pi\tau^2}{5\sqrt{5}\varepsilon_0 Q}.$$

Модуль напруженості:

$$|E| = \frac{4\pi\tau^2}{5\sqrt{5}\varepsilon_0 Q}.$$

Перевіримо, чи дає права частина отриманої рівності одиницю напруженості (В/м):

$$\frac{[\tau^2]}{[\varepsilon_0][Q]} = \frac{(1Кл/м)^2}{1Ф/м \quad 1Кл} = \frac{1Кл}{1Ф \quad 1м} = 1В/м.$$

Виразимо фізичні величини, що входять до формули (1), в одиницях СІ

(τ= $5\cdot10^{-8}$ Кл, Q=$4\cdot10^{-8}$ Кл, ε_0 =$8{,}85\cdot10^{-12}$ Ф/м) і зробимо обчислення:

$$E = \frac{4 \times 3{,}14 \times \left(5 \times 10^{-8}\right)^2}{5\sqrt{5} \times 8{,}85 \times 10^{-12} \times \quad 4 \times 10^{-8}} (В/м) = 7{,}92 \ (кВ/м).$$

Приклад 6. Дві концентричні провідні сфери радіусами R_1=6 см і R_2=10см несуть відповідно заряди Q_1=1 нКл і Q_2= -0,5 нКл. Знайти напруженість Е поля в точках, що відстоять від центра сфер на відстанях $\boldsymbol{r_1}$= 5 см ,$\boldsymbol{r_2}$=9 см, $\boldsymbol{r_3}$= 15 см. Побудувати графік Е(r).

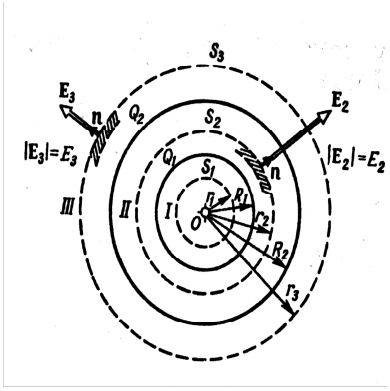

Рис.6

Розв'язок . Помітимо, що точки, у яких потрібно знайти напруженості електричного поля, лежать у трьох областях (рис. 6) області *I*(r_1 - R_1)**,** області *II* (R_1 - r_2 - R_2)**,** області *III* (r_3 - R_2)**.**

1. Для визначення напруженості E_1 в області ***I*** проведемо гауссовоі поверхні S_1 радіусом r_1 і скористаємося теоремою Остроградського-Гаусса:

$$\oint_{S_2} E_n dS = 0,$$

(тому, що сумарний заряд, який є всередині гауссової поверхні,

дорівнює нулю). З розумінь симетрії $E_n = E_1 = const$. маємо,

$$E_1 \oint_{S_1} dS = 0,$$

де E_1 (напруженість поля в області *l*) у всіх точках, що відповідають умові r_1 - R_1, буде дорівнювати нулю.

2. В області ***II*** гауссову поверхню проведемо радіусом r_2**.** У цьому разі

$$\oint_{S_2} E_n dS = Q_1/\varepsilon_0,$$

(тому, що усередині гауссової поверхні є лише заряд Q_1).

Тому, що $E_n = E = const$, то можна винести за знак інтеграла:

$$E \oint_{S_2} dS = Q_1/\varepsilon_0, \text{ чи } ES_2 = Q_1/\varepsilon_0$$

Позначивши напруженість Е для області ***II*** через E_2, одержимо:

$$E_2 = Q_1/(\varepsilon_0 S_2),$$

де $S_2 = 4\pi r_2^2$ - площа гауссової поверхні. Тоді

$$E_2 = \frac{Q_1}{4\pi\varepsilon_0 r_2^2}. \qquad (1)$$

3. В області ***III*** гауссова поверхня проводиться радіусом r_3. Позначимо напруженість Е області ***III*** через E_3 і врахуємо, що в цьому разі гауссова поверхня охоплює обидві сфери і, отже, сумарний заряд буде дорівнювати

$Q_1 + Q_2$. Тоді

$$E_3 = \frac{Q_1 + Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r_3^2}.$$

Помітивши, що Q_2 - *0*, цей вираз можна переписати у вигляді

$$E_3 = \frac{Q_1 + |Q_2|}{4\pi\varepsilon_0 r_3^2}. \qquad (2)$$

Переконаємося в тому, що права частина рівностей (1) і (2) дає одиницю напруженості:

$$\frac{[Q]}{[\varepsilon_0][r^2]} = \frac{1Кл}{1Ф/м \times 1м^2} = \frac{1Кл}{1Ф \times 1м} = 1В/м.$$

Виразимо всі величини в одиницях СІ (Q_1=10^{-9} Кл, Q_2=-0,5·10^{-9} Кл, r_1=0,09 м, r_2=0,15 м, 1/(4πε$_0$)=9·10^9м/ф) і зробимо обчислення:

$$E_2 = 9 \cdot 10^9 \frac{10^{\ 9}}{(0{,}09)^2} В/м = 1{,}11В/м;$$

$$E_3 = 9 \cdot 10^9 \frac{(1-0{,}5)10^{-9}}{(0{,}15)^2} В/м = 200В/м.$$

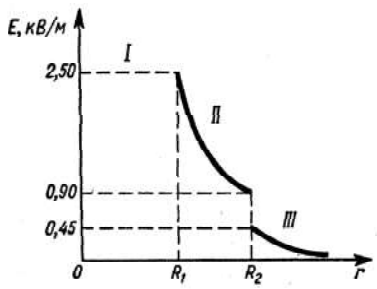

Рис.7

Побудуємо графік Е(r). В області ***I***(r_1 - R_1) Е=0, в області ***II*** (R_1 - r_2 - R_2) Е$_2$(r) змінюється за законом 1/ r^2. У точці r=R_1 напруженості

$$E_2(R_1) = E_2(R_1) = Q_1 / 4\pi\varepsilon_0 R_1^2 = 2{,}5кВ/м.$$

У точці r=R_2 (r прагне до R_2 ліворуч) $E_2(R_2) = Q_1 / 4\pi\varepsilon_0 R_2^2 = 0{,}9(кВ/м).$

В області ***III*** (r_3 -R_2) Е$_3$(r) змінюється за законом 1/ r^2, причому в точці r=R_2 (r прагне до R_2 праворуч)

$$E_3(R_2) = Q_1 \quad |Q_2| / 4\pi\varepsilon_0 R_2^2 = 0{,}45кВ/м..$$

Таким чином, функція Е(r) у точках r=R_1 і r=R_2 терпить розрив.

Графік залежності Е(r), подано на рис. 7.

Приклад 7. Точковий заряд Q=25нКл перебуває у полі, створеному прямим нескінченним циліндром радіусом R=1см, рівномірно зарядженим з поверхневою густиною σ=0,2 нКл/см^2.

Визначити силу F, що діє на заряд, якщо його відстань від вісі циліндра r =10 см.

Розв'язок. Значення сили F, що діє на точковий заряд Q, що є у полі, визначається за формулою

$$F = QE, \tag{1}$$

де E - напруженість поля.

Як відомо, напруженість поля нескінченно довгого рівномірно зарядженого циліндра

$$E = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0 r}, \tag{2}$$

де τ — лінійна густина заряду.

Виразимо лінійну густину τ через поверхневу густину σ. Для цього виділимо елемент циліндра довжиною l і виразимо заряд Q, що є на ньому, двома способами: $Q=\sigma S=\sigma 2\pi Rl$, $Q=\tau l$**.** Порівнявши праві частини цих формул і скоротивши отриману рівність на l, знайдемо $\tau=\sigma 2\pi R$. З урахуванням цього формула (2) приймає вигляд $E = R\sigma/(\varepsilon_0 r)$. Підставивши вираз E у (1), одержимо

$$F = QR\sigma/(\varepsilon_0 r).$$

Зробимо обчислення:

$$F = \frac{2{,}5\cdot 10^{-8}\cdot 2\cdot 10^{-6}}{8{,}85\cdot 10^{-12}\cdot 10}(H) = 5{,}65\cdot 10^{-4}(H) = 565(мкН).$$

Сила F збігається за напрямком з напруженістю E, що через симетрію (циліндр нескінченно довгий) перпендикулярна поверхні циліндра.

Приклад 8. По тонкій нитці, вигнутій по дузі кола, рівномірно

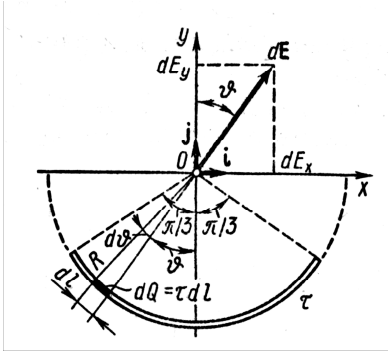

Рис.8

розподілений заряд з лінійною густиною τ=10 нКл/м. Визначити напруженість *E* і потенціал *φ* електричного поля, створеного таким розподіленим зарядом у точці, що збігається з центром кривизни дуги. Довжина *l* нитки становить 1/3 довжини кола і дорівнює 15 см.

Розв'язок. Виберемо осі координат так, щоб початок координат збігався з центром кривизни дуги, а вісь О*y* була б симетрично розташована щодо кінців дуги. На нитці виділимо елемент довжини *dl (* рис. 8). Заряд *dQ=τdl*, що є на виділеній ділянці, можна вважати точковим. Визначимо напруженість електричного поля в точці О. Для цього знайдемо спочатку напруженість *dE* поля, створеного зарядом *dQ*:

$$dE = \frac{\tau dl}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \cdot \frac{r}{r},$$

де *r* - радіус-вектор, спрямований від елемента *dl* до точки, у якій обчислюється напруженість.

Виразимо вектор *dE* через проекції dE_x і dE_y на осі координат:

$$dE = \mathrm{i}dE_x + \mathrm{j}dE_y,$$

де i, *j* - одиничні вектори напрямків (орти). Напруженість *E* знайдемо інтегруванням:

$$E = \int_l dE = \mathrm{i}\int_l dE_x + \mathrm{j}\int_l dE_y.$$

Інтегрування ведеться уздовж дуги довжиною *l*. Через симетрію $\int_l dE_x = 0$. Тоді

$$E = j\int_l dE_y, \qquad (1)$$

де

$dEy = dEcoc = \tau dl\cos/\left(4\pi\varepsilon_0 r^2\right)$. Тому, що $r = R = const, \quad dl = Rd\vartheta$, тоді:

$$E = \mathrm{j}\frac{\tau R d\vartheta}{4\pi\varepsilon_0 R^2}\cdot\cos\vartheta = \frac{\tau}{4\pi\varepsilon_0 R}\cdot\cos\vartheta d\vartheta.$$

Підставимо вираз dE_y в (1) і, беручи до уваги симетричне розташування дуги щодо осі Оy, межі інтегрування візьмемо від 0 до π/3, а результат подвоїмо:

$$E = \mathrm{j}\frac{2\tau}{4\pi\varepsilon_0 R}\int_0^{\pi/3}\cos\vartheta d\vartheta = \mathrm{j}\frac{2\tau}{4\pi\varepsilon_0 R}\cdot\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Виразивши радіус R через довжину l нитки **(**$3l=2\pi R$**)**, одержимо

$$E = \mathrm{j}\frac{\tau}{6\varepsilon_0 l}\sqrt{3}. \qquad (2)$$

З цієї формули видно, що напруженість поля за напрямком збігається з віссю Оy.

Знайдемо потенціал електричного поля в точці О. Спочатку знайдемо потенціал dφ, створений точковим зарядом dQ у точці О:

$$d\varphi = \tau dl/(4\pi\varepsilon_0 r).$$

Замінимо r на R і проведемо інтегрування:

$$\varphi = \frac{\tau}{4\pi\varepsilon_0 R}\int_0^l dl = \frac{\tau l}{4\pi\varepsilon_0 R}.$$

Тому, що $l = 2\pi R/3$, то

$$\varphi = \tau/6\varepsilon_0 \ . \qquad (3)$$

Зробимо обчислення за формулами (2) і (3):

$$E = \frac{10^{-8}\cdot 1{,}73}{6\cdot 8{,}55\cdot 10^{-12}\cdot 0{,}15}\,В/м = 2{,}18\,кВ/м.$$

$$\varphi = \frac{10^{-8}}{6 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12}} B = 188 B.$$

Приклад 9. На тонкому стержні довжиною l є рівномірно розподілений заряд з лінійною густиною τ=10нКл/м. Знайти потенціал φ, утворений розподіленим зарядом у точці А, розташованої на осі стержня і віддаленої від його найближчого кінця на відстань l.

Розв'язок. У задачі розглядається поле, утворене розподіленим зарядом. У цьому разі використовують такий спосіб. На стержні виділяють малу ділянку довжиною dx**.** Тоді на цій ділянці буде зосереджений заряд $dQ=\tau dx$, який можна вважати точковим.

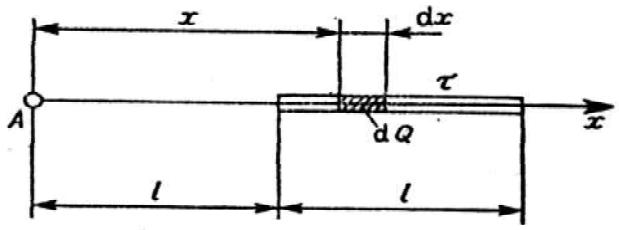

Рис.9

Потенціал $d\varphi$, утворений цим точковим зарядом у точці А (рис. 9) можна визначити за формулою

$$d \quad = \frac{dQ}{4\pi\varepsilon_0 x} = \frac{\tau dx}{4\pi\varepsilon_0 x}.$$

Відповідно до принципу суперпозиції електричних полів, потенціал електричного поля, утвореного зарядженим стержнем у точці А, знайдемо інтегрування цього виразу:

$$\varphi = \int_l^{2l} \frac{\tau dx}{4\pi\varepsilon_0 x} = \frac{\tau}{4\pi\varepsilon_0} \int_l^{2l} \frac{dx}{x}.$$

Виконаємо інтегрування:

$$\varphi = \frac{\tau}{4\pi\varepsilon_0} \ln x \Big|_l^{2l} = \frac{\tau}{4\pi\varepsilon_0} \ln 2.$$

Підставимо числові значення фізичних величин у СІ ($\tau = 10 \cdot 10^{-9}$ Кл/м $1/(4\pi\varepsilon_0) = 9 \cdot 10^9$ м/Ф), і зробимо обчислення:

$$\varphi = 9 \cdot 10^9 \cdot 10 \cdot 10^{-9} \cdot 0{,}693B = 62{,}4B.$$

Приклад 10. На пластинах плоского конденсатора є заряд Q=10 нКл. Площа S кожної пластини конденсатора дорівнює 100 см^2, діелектрик - повітря. Визначити силу F, з якою притягуються пластини. Поле між пластинами вважати однорідним.

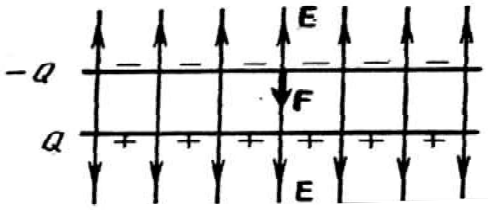

Рис.10

Розв'язок. Заряд Q однієї пластини перебуває в полі напруженістю E, створеному зарядом іншої пластини конденсатора. Отже, на перший заряд діє сила (рис. 10)

$$F = Q / E . \qquad (1)$$

Тому, що

$$E = \sigma/(2\varepsilon_0) = Q/(2\varepsilon_0 S),$$

де σ - поверхнева густина заряду пластини, то формула (1) прийме вигляд:

$$F = Q^2/(2\varepsilon_0 S).$$

Виконаємо обчислення:

$$F = \frac{10^{-16}}{2 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{-12}} H = 5{,}65 \cdot 10^{-4}(H) = 565(\text{ìêÍ}).$$

Приклад 11. Електричне поле створене довгим циліндром радіусом R=1 см, рівномірно зарядженим з лінійною густиною

τ=20нКл/м. Визначити різницю потенціалів двох точок цього поля, що перебувають на відстані a_1=0,5 см і a_2=2 см від поверхні циліндра, у середній його частині.

Розв'язок. Для визначення різниці потенціалів скористаємося співвідношенням між напруженістю поля і зміною потенціалу: $E = -grad\ \varphi$. Для поля з осьовою симетрією, яким є поле циліндра, це співвідношення можна записати у вигляді

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

де $d\varphi = -Edr.$

Інтегруючи цей вираз, знайдемо різницю потенціалів двох точок, що перебувають на відстанях r_1 і r_2 від вісі циліндра:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = -\int_{r_1}^{r_2} Edr. \qquad (1)$$

Тому, що циліндр довгий і точки взяті поблизу його середньої частини, то для виразу напруженості поля можна скористатися формулою напруженості поля, створеного нескінченно довгим циліндром:

$$E = \tau/(2\pi\varepsilon_0 r).$$

Підставивши вираз E в (1), одержимо

$$\varphi_1 - \varphi_2 = -\frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\int_{r_1}^{r_2}\frac{dr}{r} = -\frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0}\cdot\ln\frac{r_2}{r_1}$$

чи

$$\varphi_1 - \varphi_2 = -\frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0}\cdot\ln\frac{r_2}{r_1}.$$

Зробимо обчислення, з огляду на те, що величини r_1 і r_2, що входять до формули (2) у вигляді відношення, можна виразити в

сантиметрах ($r_1=R+a_1=1{,}5$ см, $r_2=R+a_2=3$ см):

$$\varphi_1-\varphi_2=2\cdot10^{-8}\cdot1{,}8\cdot10^{10}\cdot\ln(3/1{,}5)=3{,}6\cdot10^{2}\cdot2{,}3\cdot\ln2\,B=250\,B.$$

Приклад 12. Електричне поле створюється двома зарядами Q_1=4мкКл і Q_2=-2мкКл, що перебувають на відстані a=0,1 м один від одного. Визначити роботу $A_{1,2}$ сил поля по переміщенню заряду Q=50 нКл із точки 1 у точку 2 (рис. 11)

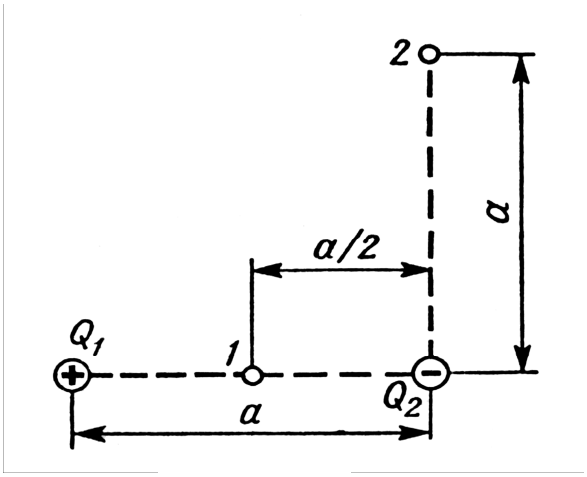

Рис.11

Розв'язок. Для визначення роботи $A_{1,2}$ сил поля скористаємося співвідношенням

$$A_{1,2}=Q(\varphi_1-\varphi_2)$$

Застосовуючи принцип суперпозиції електричних полів, визначимо потенціали φ_1 і φ_2 точок 1 і 2 поля:

$$\varphi_1=\frac{Q_1}{4\pi\varepsilon_0 a\sqrt{2}}+\frac{Q_2}{4\pi\varepsilon_0 a\sqrt{2}}=\frac{2(Q_1+Q_2)}{4\pi\varepsilon_0 a},$$

$$\varphi_1=\frac{Q_1}{4\pi\varepsilon_0 a\sqrt{2}}+\frac{Q_2}{4\pi\varepsilon_0 a}=\frac{Q_1\sqrt{2}+Q_2}{4\pi\varepsilon_0 a/2}.$$

Тоді

$$A_{1,2}=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 a}\left[2(Q_1+Q_2)-\left(Q/\sqrt{2}+Q_2\right)\right],$$

чи

$$A_{1,2}=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 a}\left[Q_1\cdot\left(2-\frac{1}{\sqrt{2}}\right)+Q_2\right].$$

Перевіримо, чи дає права частина рівності одиницю роботи (Дж):

$$\frac{[Q][Q_1]}{[\varepsilon_0][a]} = \frac{1Кл \times 1Кл}{1Ф/м \times 1м} = 1Кл \times 1В = 1Дж.$$

Підставимо числові значення фізичних величин у СІ (Q=50·10^{-9} Кл, Q_1=4·10^{-6}Кл, Q_2=2·10^{-6} Кл, a=0,1 м, 1/(4πε$_0$) =9·10^9 м/Ф) і зробимо обчислення:

$$A_{1,2} = \frac{50 \cdot 10^{-9} \cdot 9 \cdot 10^9}{0{,}1}\left[4 \cdot \left(2 - 1/\sqrt{2}\right) - 2\right] \cdot 10^{-6}\,Дж = 14{,}3\,мДж.$$

Приклад 13. Визначити прискорюючу різницю потенціалів U**,** яку повинен пройти в електричному полі електрон, що має швидкість υ= 10^6 м/с, щоб швидкість його зросла в n=2 рази.

Розв'язок. Різницю потенціалів, що прискорює, можна знайти, обчисливши роботу A сил електростатичного поля. Ця робота визначається добутком елементарного заряду e на різницю потенціалів U:

$$\mathrm{A} = e \cdot U \qquad (1)$$

Робота сил електростатичного поля в даному разі дорівнює зміні кінетичної енергії електрона:

$$A = T_2 - T_1 = \frac{m\upsilon_2^2}{2} - \frac{m\upsilon_1^2}{2}, \qquad (2)$$

де T_1 і T_2 - кінетична енергія електрона до і після проходження поля, що прискорює; m - маса електрона; υ_1 і υ_2 - початкова і кінцева його швидкості.

Порівнявши праві частини рівностей (1) і (2), отримаємо

$$eU = \frac{m\upsilon_2^2}{2} - \frac{m\upsilon_1^2}{2} = \frac{mn^2\upsilon_1^2}{2} - \frac{m\upsilon_1^2}{2},$$

де $n=\upsilon_2/\upsilon_1$.

Звідси шукану різницю потенціалів отримаємо:

$$U = \frac{m\upsilon_1^2 \cdot (n^2 - 1)}{2 \cdot e}.$$

Зробимо обчислення:

$$U = \frac{9{,}1 \times 10^{-31} \times (10^6)^2}{2 \times 1{,}6 \times 10^{-19}}(2^2 - 1) = 8{,}53(B).$$

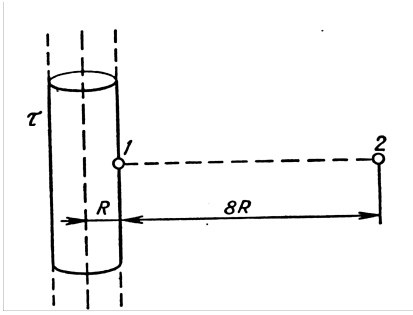

Рис.12

Приклад 14. З поверхні нескінченного рівномірно зарядженого (τ=50 нКл/м) прямого циліндра вилітає α - частинка (υ_0=0). Визначити кінетичну енергію T_2 α- частинки (кеВ) у точках 1 і 2 на відстані 8R від поверхні циліндра (рис. 12).

Розв'язок. Тому, що сили електростатичного поля є консервативними то, для визначення кінетичної енергії α- частинки в точці 2 скористаємося законом збереження енергії, записаному у вигляді E_1=E_2, де E_1 і E_2 - сповненої енергії α-частинки в точках l і 2. Так як $E_1=T_1+U_1$ *і* $E_2=T_2+U_2$ (T_1 і T_2 - кінетичні енергії α -частинки; U_1 і U_2 — потенційні), тоді, з огляду на те, що T_1=0 (υ_0=0), можна записати $U_1=T_2+U_2$, звідки $T_2=U_1-U_2=Q(\varphi_1-\varphi_2)$ (Q - заряд α- частинки; φ_1 і φ_2 - потенціали точок 1 і 2).

Використовуючи рішення прикладу 11, запишемо:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0} \cdot \ln\frac{r_2}{r_1} = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0} \cdot \ln 9.$$

Виразимо всі величини в одиницях СІ ($Q=2\cdot1{,}60\cdot10^{-19}$ Кл, $\tau=50\cdot10^{-9}$ Кл/м, $1/(2\pi\varepsilon_0)=18\cdot10^9$ м/Ф) і зробимо обчислення

(1/(1,60·10^{-19}) — коефіцієнт перекладу з Дж в еВ):

$$T_2 = 18 \cdot 10^9 \times \frac{2 \cdot 1{,}60 \cdot 10^{-19} \cdot 50 \cdot 10^{-9}}{1{,}60 \cdot 10^{-19}} \times 2{,}20 = 3696(кеВ).$$

Приклад 15. Конденсатор ємністю C_1=3 мкФ був заряджений до різниці потенціалів U_1=40В. Після відключення від джерела струму конденсатор з'єднали паралельно з іншим незарядженим конденсатором ємністю C_2=5 мкФ. Яка енергія W витратиться на утворення іскри в момент приєднання другого конденсатора?

Розв'язок. Енергія, витрачена на утворення іскри

$$W = W_1 - W_2, \tag{1}$$

де W_1 - енергія, яку мав перший конденсатор до приєднання до нього другого конденсатора; W_2 - енергія, що має батарея, складена з двох конденсаторів.

Енергія зарядженого конденсатора визначається за формулою

$$W = \frac{CU^2}{2}, \tag{2}$$

де C - ємність конденсатора чи батареї конденсаторів.

Виразивши з формули (1) енергії W_1 і W_2 за формулою (2) і беручи до уваги, що загальна ємність паралельно з'єднаних конденсаторів дорівнює сумі ємностей окремих конденсаторів, одержимо

$$W = \frac{1}{2}C_1U_1^2 - \frac{1}{2}(C_1 + C_2)U_2^2, \tag{3}$$

де U_2 - різниця потенціалів на затисках батареї конденсаторів.

З урахуванням того, що заряд після приєднання другого конденсатора залишився таким же, виразимо різницю потенціалів U_2 у такий спосіб:

$$U_2 = \frac{Q}{C_1 + C_2} = \frac{C_1 U_1}{C_1 + C_2}. \qquad (4)$$

Підставивши вирази U_2 у (3), знайдемо

$$W = \frac{C_1 U_1^2}{2} - \frac{(C_1 + C_2) C_1^2 U_1^2}{2(C_1 + C_2)^2}, \qquad \text{чи} \qquad W = \frac{1}{2} \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} U_1^2.$$

Зробимо обчислення:

$$W = \frac{1}{2} \frac{3 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^{-6} + 5 \cdot 10^{-6}} \cdot 1600 = 1{,}5 (мДж).$$

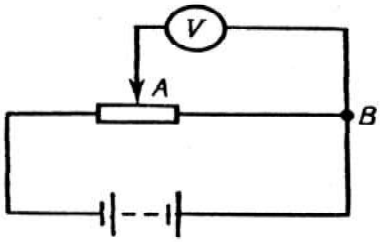

Рис.13

Приклад 16. Потенціометр опором R=100Ом підключений до батареї з ЕРС ε=150В і внутрішнім опором R_i=50Ом. Визначити:

1) показання вольтметра опором R_V=500Ом, з'єднаного з однією з клем потенціометра і рухливим контактом, установленим посередині потенціометра;

2) різницю потенціалів між тими ж точками потенціометра при відключенні вольтметра.

Розв'язок. 1. Показання вольтметра, підключеного до точок А і В (рис. 13), визначимо за формулою

$$U_1 = I_1 R_1,$$

де R_1 - опір паралельно з'єднаних вольтметра і половини потенціометра; I_1 - сумарна сила струму в галузях цього з'єднання (вона дорівнює силі струму в нерозгалуженій частині ланцюга).

Силу струму I_1 знайдемо за законом Ома для повного ланцюга:

$$I_1 = \varepsilon / (R_e + R_i), \qquad (1)$$

де R_e - опір зовнішнього ланцюга. Цей опір є сума двох опорів:

$$R_e = R/2 + R_1. \qquad (2)$$

Опір R_1 знайдемо по формулі паралельного з'єднання провідників

$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_V} + \frac{1}{R/2}$, звідти $R_1 = \frac{R \cdot R_V}{R + 2R_V}$.

Підставивши в (1) вираз R_e по (2), знайдемо

$$I_1 = \frac{\varepsilon}{R/2 + R_1 + R_i}.$$

У даному разі розв'язок задачі в загальному вигляді було б громіздким. Тому зручно обчислення величин зробити окремо:

$$R_1 = \frac{500 \cdot 100}{100 + 2 \cdot 500} = 45{,}5(Ом);$$

$$I_1 = \frac{150}{50 + 45{,}5 + 50} = 1{,}03(A);$$

$$U_1 = 1{,}03 \cdot 45 \cdot 5 = 46{,}9(B).$$

2. Різниця потенціалів між точками А і В при відключеному вольтметрі дорівнює добутку сили струму I_2 на половину опору потенціометра:

$$U_2 = I_2 \cdot R/2, \qquad (3)$$

де I_2 — сила струму в ланцюзі при відключеному вольтметрі. Її визначимо за формулою

$$I_2 = \varepsilon/(R + R_i).$$

Підставивши вираз I_2 у (3), знайдемо

$$U_2 = \varepsilon/(R + R_i) \cdot R/2.$$

Зробимо обчислення:

$$U_2 = \frac{150}{100 + 50} \cdot \frac{100}{2} = 50(B).$$

Приклад 17. Сила струму в провіднику опором R=20 Ом зростає протягом часу Δt=2с за лінійним законом від I_0=0А до I_1=6А (рис.14). Визначити теплоту Q_1, що виділилася в цьому провіднику за першу секунду, і Q_2 - за другу, а також знайти відношення Q_2/Q_1.

Розв'язок. Закон Джоуля-Ленца у вигляді $Q=I^2Rt$ справедливий для постійного струму (I=const). Якщо ж сила струму в провіднику змінюється, то закон зазначений нескінченно малий інтервал часу записується у вигляді

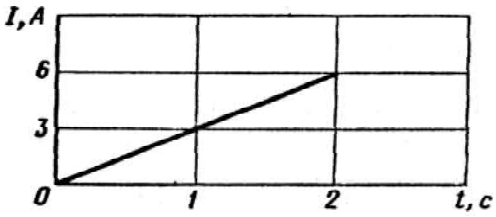

Рис.14

$$dQ = I^2 Rdt\,, \qquad (1)$$

де сила струму I є деякою функцією часу. У даному разі

$$I = kt, \qquad (2)$$

де k - коефіцієнт пропорційності, що характеризує швидкість зміни сили струму: $k = \frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{6}{2} A/c = 3A/c.$

З урахуванням (2) формула (1) матиме вигляд

$$dQ = k^2 Rt^2 dt\,. \qquad (3)$$

Для визначення теплоти, що виділилася за кінцевий інтервал часу Δt, вираз (3) треба проінтегрувати в межах від t_1 до t_2.

$$Q = k2R\int_{t_1}^{t_2} t2dt = \frac{1}{3}k2R(t_2^3 - t_1^3).$$

Зробимо обчислення:

$$Q_1 = \frac{1}{3}\cdot 3^2 \cdot 20(1-0)Дж = 60Дж.$$

$$Q_2 = \frac{1}{3}\cdot 3^2 \cdot 20(8-0)Дж = 420Дж.$$

відповідно за другу секунду виділиться теплоти в сім разів більше,

ніж за першу. $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{420}{60} = 7$

1.3. Задачі для самостійного розв'язку

1. Дві кульки масою m=1 г кожна підвішені на нитках, верхні кінці яких з'єднані разом. Довжина кожної нитки l=10 см. Які однакові заряди слід надати кулькам, щоб нитки розійшлися на кут α=60°? [79 нКл]

2. Відстань між зарядами Q_1=100нКл і Q_2=-50 нКл дорівнює d=10 см. Визначити силу F, що діє на заряд Q_3=1мкКл, який перебуває на відстані на r_1=12 см від заряду Q_1 і на r_2=10 см від заряду Q_2. [51мН]

3. Тонкий довгий стержень рівномірно заряджений з лінійною густиною τ=1,5нКл/см. На продовженні осі стержня на відстані d=2 см від його кінця знаходиться точковий заряд Q=0,2мкКл. Визначити силу взаємодії зарядженого стержня і точкового заряду. [2,25мН]

4. Довгий прямий тонкий дріт має рівномірно розподілений заряд. Обчислити лінійну густину τ заряду, якщо напруженість поля на відстані r=0,5 м від дроту проти його середини E=2 В/см. [5,55нКл/м]

5. З якою силою, що приходиться на одиницю площі, відштовхуються дві однойменно заряджені нескінченно протяжні площини з однаковою поверхневою густиною заряду σ=2 мкКл/м^2? [0,23 Н/м^2]

6. Яку прискорюючу різницю потенціалів U має пройти електрон, щоб одержати швидкість V =8 Мм/с? [182 В]

7. Заряд рівномірно розподілений по нескінченній площині з поверхневою густиною σ=10нКл/м^2. Визначити різницю потенціалів

двох точок поля, одна з яких перебуває на площині, а інша віддалена від неї на відстань a=10 см. [56,6 В]

8. Електрон з початковою швидкістю υ=3 Мм/с влетів у однорідне електричне поле напруженістю E=150В/м. Вектор початкової швидкості перпендикулярний лініям напруженості електричного поля. Визначити: 1) силу, що діє на електрон; 2) прискорення, що здобувається електроном; 3) швидкість електрона через t=0,1 мкс. [24 аН; 26,4 Тм/с^2; 4 Мм/с]

9. До батареї з ЕРС ε=300 В підключено два плоских конденсатори ємностями C_1=2 пФ і C_2=3 пФ. Визначити заряд Q і напругу U на пластинках конденсаторів при послідовному і паралельному з'єднаннях. [1) 0,36 нКл; 180 В; 120 В; 2) 0,6 нКл; 0,9кКл; 300 В]

10. Конденсатор ємністю C_1=600 пФ зарядили до різниці потенціалів U_1=1,5 кВ і відключили від джерела напруги. Потім до нього паралельно приєднали незаряджений конденсатор ємністю C_2=400 пФ. Визначити енергію, витрачену на утворення іскри, що проскочила при з'єднанні конденсаторів. [0,27 мДж]

11. На кінцях мідного дроту довжиною l=5 м підтримується напруга U=l В. Визначити густину струму в дроті. [1,18·10^7 А/м^2]

12. Резистор опором R_1=5 Ом, вольтметр і джерело струму з'єднані паралельно. Вольтметр показує напругу U_1=10 В. Якщо замінити резистор іншим з опором R_2 =12 Ом, то вольтметр покаже напругу U_2 =12 В. Визначити ЕРС і внутрішній опір джерела струму. Струмом через вольтметр знехтувати. [14 В; 2 Ом]

13. Визначити електричний заряд, що пройшов через поперечний переріз дроту опором R=3Ом при рівномірному наростанні напруги на

кінцях провідника від U_1 =2В до U_2=4В протягом t=20 с. [20 Кл]

14. Визначити силу струму в ланцюзі, що складається з двох елементів ЕРС: ε_1=1,6В і ε_2=1,2В і внутрішніми опорами R_1 =0,6Ом і R_2=0,4Ом, з'єднаних однойменними полюсами. [0,4 А]

15. Гальванічний елемент дає на зовнішній опір R_1=0,5Ом силу струму I_1=0,2А. Якщо зовнішній опір замінити на R_2=0,8Ом, то елемент дає силу струму I_2=0,15А. Визначити силу струму короткого замикання. [0,45 А]

16. До джерела струму з ЕРС=12В приєднане навантаження. Напруга U на клемах джерела стала при цьому рівною 8В. Визначити ККД джерела струму. [68%]

17. Зовнішній ланцюг джерела струму споживає потужність Р=0,75Вт. Визначити силу струму в ланцюзі, якщо ЕРС джерела струму ε=2В і внутрішній опір R=l Ом. [0,5 і 1,5 А]

18. Яка найбільша корисна потужність P_{max} може бути отримана від джерела струму з ЕРС ε=12В і внутрішнім опором R=l Ом? [36 Вт]

19. При вимиканні джерела струму сила струму в ланцюзі убуває за законом $I=I_0e^{-\alpha t}$ ($I_{0=}$10 А, α =$5\cdot10^2$ c^{-1}). Визначити кількість теплоти, що виділиться в резисторі опором R=5 Ом після вимикання джерела струму. [0,5 Дж]

1.4. Приклади тестових питань для захисту теоретичної частини змісту модуля

1). Що називається "Електростатикою":

-наука, що вивчає властивості нерухомих зарядів та їх взаємодію, а також властивість їхніх полів ;

-наука, що вивчає властивості зарядів та їх взаємодію ;

-наука, що вивчає взаємодію електричних та магнітних полів ;

-наука, що вивчає властивості рухомих зарядів та їх взаємодію, а також властивість їхніх полів.

2)Взаємодія між зарядами відбувається через:

- ефір ;

- повітря ;

- вакуум ;

- поле.

3).Як називається негативна елементарна заряджена частинка?:

- протон ;

- нейтрон ;

- електрон ;

-позитрон.

4).Як позначається питомий заряд елекрона?:

- e/m;

-m/e;

-q;

-e.

5).Як називається позитивна елементарна частинка?:

-протон ;

-нейтрон ;

-електрон ;

- позитрон .

6). Вибери правильне твердження закону збереження заряду:

- повний електричний заряд є неподільною величиною ;

- повний електричний заряд в замкненій системі є величина постійна і дорівнює алгебричній сумі її позитивних та негативних зарядів ;

- повний електричний заряд в замкненій системі є величина постійна і дорівнює алгебричній сумі її позитивних зарядів ;

- повний електричний заряд в замкненій системі є величина постійна і дорівнює алгебричній сумі її негативних зарядів.

7).Вибери правильне твердження закону закону Кулона:

- сила взаємодії двох нерухомих точкових зарядів у вакуумі прямопропорційна добуткові модулів двох зарядів і обернено пропорційна квадратові відстані між ними ;

- сила взаємодії двох нерухомих точкових зарядів у вакуумі прямо пропорційна сумі модулів двох зарядів і обернено пропорційна квадратові відстані між ними ;

- сила взаємодії двох нерухомих точкових зарядів у вакуумі прямопропорційна добуткові модулів двох зарядів і обернено пропорційна відстані між ними.

8).Формула закону Кулона:

а) $F = \frac{B}{2\mu\mu_0} S$; б) $F = k\frac{|q_1||q_2|}{r^2}$; в) $F = mgh$.

9). Принцип суперпозиції:

-сила, що діє на даний точковий заряд з боку двох інших точкових зарядів, дорівнює векторній сумі сил, що діють на нього з боку двох інших зарядів ;

-сила, що діє на даний точковий заряд з боку двох інших точкових зарядів, дорівнює векторній різниці сил, що діють на нього з боку двох інших зарядів ;

-сила, що діє на даний точковий заряд з боку двох інших точкових зарядів, дорівнює векторному добутку сил, що діють на нього з боку двох інших зарядів .

10).Електричне поле це:

- вид матерії, яке існує незалежно від нас, існує навколо нерухомого електричного заряду, та проявляється при внесені пробного негативного заряду ;
- вид матерії, яке існує незалежно від нас, існує навколо рухомого електричного заряду, та проявляється при внесені пробного негативного заряду ;
- вид матерії, яке існує незалежно від нас та утворюється навколо нерухомого електричного заряду, а також змінним у часі магнітним полем, та проявляється при внесені пробного негативного заряду.

10).Які із перерахованих величин є характеристики електричного поля:

-напруга, потенціал ;

-напруга, напруженість ;

-напруженість, потенціал ;

- потенціал ;
- напруженість .

11). Напруженість це:

- векторна величина яка чисельно дорівнює силі, що діє з боку поля на одиничний позитивний заряд вміщений у це поле ;
- векторна величина яка чисельно дорівнює силі, що діє з боку поля на одиничний негативний заряд вміщений у це поле ;
- векторна величина яка чисельно дорівнює потенціалу, що діє з боку поля на одиничний позитивний заряд вміщений у це поле.

12). Формула напруженості:

а) $\mathring{A} = \frac{mv^2}{2}$; б) $E = mgh$; в) $E = \frac{F_k}{q}$.

13).Напруженість підкоряється принципу суперпозиції?:

- ні ;

- так ;

- правильної відповіді немає.

14). Формула потенціалу:

а) $I = \frac{U}{R}$; б) $\varphi = \frac{A}{q}$; в) $\varphi = \frac{F}{S}$.

15). Потенціал це:

- робота сторонніх сил по розподілу заряду ;

- робота електричного поля при переміщенні заряду з точки в нескінченість ;

- робота електричного поля при переміщенні заряду з точки в точку.

16). Напруга це:

- робота сторонніх сил по розподілу заряду ;

- робота електричного поля при переміщенні заряду з точки в нескінченість ;

- робота електричного поля при переміщенні заряду з точки в точку

- правильної відповіді немає.

17). Формула напруги:

а) $E = mgh$; б) $U = \frac{A}{q}$; в) $\mathring{A} = \frac{mv^2}{2}$.

18) Формула ємності:

а) $c = \frac{U}{q}$; б) $\varepsilon = \frac{E_0}{E}$; в) $C = \frac{q}{u}$.

19). Електрична ємність:

- чисельно рівна зарядові, який потрібний для зміни потенціалу на одиницю ;

- чисельно рівна питомому зарядові, який потрібний для зміни потенціалу на одиницю ;

- чисельно рівна силі струму, який потрібний для зміни потенціалу на одиницю .

20). Формула ємності при послідовному з'єднані конденсаторів:

а) $\tilde{N} = \tilde{N}_1 + \tilde{N}_2 + \tilde{N}_3 + ...\tilde{N}_n$;

б) $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + ...\frac{1}{C_n}$;

в) $C = (n+1)C_n$.

21). Формула енергії електричного поля:

а) $W = \frac{CU^2}{2}$; б) $W = \frac{I^2 L}{2}$; в) $W = \frac{q^2}{2C}$

22).Електричний струм це:

- упорядкований рух електронів ;

- упорядкований рух молекул ;

- упорядкований рух протонів ;

- упорядкований рух нейтронів.

23) Сила струму це:

- кількість упорядкованих електронів, що пройшли по провіднику ;

- кількість упорядкованих молекул, що пройшов по провіднику ;

- кількість заряду за одиницю часу, що пройшов по провіднику.

24) Формула сили струму:

а) $I = \frac{E}{q}$; б) $I = \frac{dq}{dt}$; в) $C = \frac{U}{q}$.

25).Формула закону Ома для ділянки кола:

а) $I = \frac{U}{R}$; б) $I = \frac{dq}{dt}$; в) $I = \frac{L}{q}$.

26). Формула закону Ома для повного кола:

а) $I = \frac{U}{R}$; б) $I = \frac{\varepsilon}{R + r}$; в) $I = \frac{L}{q_1 + q_2}$.

27). Формула опору довгого провідника:

а) $R = \frac{S}{l}$; б) $R = \rho \frac{l}{S}$; в) $R = \rho \frac{S}{h}$.

28).Формула ємності при паралельному з'єднані конденсаторів:

а) $\tilde{N} = \tilde{N}_1 + \tilde{N}_2 + \tilde{N}_3 + ...\tilde{N}_n$;

б) $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + ...\frac{1}{C_n}$;

в) $C = (n+1)C_n$.

29).Причини опору:

- це тепловий рух та взаємодія ;
- це упорядкований рух молекул ;
- це упорядкований рух протонів ;
- це упорядкований рух атомів.

30). Електрорушійна сила це:

- робота сторонніх сил по розподілу заряду ;
- робота електричного поля при переміщенні заряду з точки в нескінченість ;
- робота електричного поля при переміщенні заряду з точки в точку.

31). Формула електрорушійної сили:

а) $\varepsilon = \frac{\grave{A}}{q}$; б) $I = \frac{\varepsilon}{R + r}$; в) $\varepsilon = \frac{M}{I}$.

32). Перший закон Кірхгофа:

а) $\sum_{k=1}^{n} I_k = 0$; б) $\sum_{k=1}^{n} U_k = 0$; в) $\sum_{k=1}^{n} \varepsilon_k = 0$.

33). Другий закон Кірхгофа:

а) $\sum_{k=1}^{n} I_k = 0$; б) $\sum_{k=1}^{n} U_k = 0$; в) $\sum_{k=1}^{n} \varepsilon_k = 0$.

34).Формула опору при послідовному з'єднанні:

а) $R = R_1 + R_2 + ...R_n$; б) $R = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + ...\frac{1}{R_n}\right)^{-1}$; в) $R = R \cdot n$.

34). Формула опору при паралельному з'єднанні:

а) $R = R_1 + R_2 + ...R_n$; б) $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + ...\frac{1}{R_n}$; в) $R = R \cdot n$.

35).Формула роботи електричного поля:

а) $\grave{A} = I^2 R$; б) $\grave{A} = I^2 Rt$; в) $\grave{A} = I^2 RU$.

36). Формула потужності постійного струму:

а) $P = IR$; б) $P = IU$; в) $P = \frac{I}{U}$.

37).Потужність це:

- величина, що чисельно дорівнює роботі, яку виконує струм за одиницю часу ;

- величина, що чисельно дорівнює ЕРС, яка виникає при проходженні струму за одиницю часу ;

- величина, що чисельно дорівнює теплоті яка виділяється при проходженні струму за одиницю часу ;

- правильної відповіді немає.

38). Закон Джоуля - Ленца:

а) $Q = I^2 R$; б) $Q = I^2 Rt$; в) $Q = I^2 RU$.

39). Виберіть правильне твердження І-го закону Кірхгофа:

- алгебраїчна сума сил струмів, що сходяться у вузлі, дорівнює нулю ;
- алгебраїчна сума спадів напруг на ділянці кола, дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС на цих ділянках ;
- алгебраїчна сума спадів напруг у вузлі, дорівнює нулю ;
- алгебраїчна сума сил струмів, що сходяться у вузлі, дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС на цих ділянках.

40). Виберіть правильне твердження ІІ-го закону Кірхгофа:
- алгебраїчна сума сил струмів, що сходяться у вузлі, дорівнює нулю ;
- алгебраїчна сума спадів напруг на ділянці кола, дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС на цих ділянках ;
- алгебраїчна сума спадів напруг у вузлі, дорівнює нулю ;
- алгебраїчна сума сил струмів, що сходяться у вузлі, дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС на цих ділянках.

55).Одиниці виміру питомого опору:
а) Ом·м; кг·см; км/ч.

56). Залежить опір провідника від довжини його?:
- ні;
- так;
- залежить тільки від роду речовини;
- правильної відповіді немає.

57).При паралельному з’єднані сила струму залишається сталою?:
- залишається;
- ні;
- залежить тільки від опору провідника;
- правильної відповіді немає.

58).При послідовному з’єднані напруга залишається сталою?:

- ні;
- так;
- залежить лише від опору провідника;
- правильної відповіді немає.

1.5. Контрольна робота №3

Таблиця варіантів

Варіант	Номера задач			
1	1	31	41	61
2	2	32	42	62
3	3	33	43	63
4	4	34	44	64
5	5	35	45	65
6	6	336	46	66
7	7	37	47	67
8	8	38	48	68
9	9	39	49	69
10	10	40	50	70
11	11	41	51	71
12	12	42	52	72
13	13	43	53	73
14	14	44	54	74
15	15	45	55	75
16	16	46	56	76
17	17	47	57	77
18	18	48	58	78
19	19	49	59	79
20	20	50	60	80
21	21	51	61	81
22	22	52	62	82
23	23	53	63	83
34	24	54	64	84
25	25	55	65	85
26	26	56	66	86
27	27	57	67	87
28	28	58	68	88
29	29	59	69	89
30	30	60	70	90

1. Точкові заряди Q_1=20мкКл, $Q_{2=}$-10мкКл перебувають на відстані d=5 см один до одного. Визначити напруженість поля в точці,

віддаленій на r_1=3 см від першого і на r_2=4 см від другого заряду. Визначити також силу F, що діє в цій точці на точковий заряд Q=1мкКл.

2. Три однакових точкових заряди $Q_1=Q_2=Q_3$=2нКл є у вершинах рівностороннього трикутника зі сторонами *a* =10см. Визначити модуль і напрямок сили F, що діє на один із зарядів з боку двох інших.

3. Два позитивних точкових заряди Q і 9Q закріплені на відстані d=100 см один від одного. Визначити, у якій точці на прямій, що проходить через заряди, варто помістити третій заряд так, щоб він був у рівновазі. Вказати, який знак повинен мати цей заряд для того, щоб рівновага була стійкою, якщо переміщення зарядів можливі лише вздовж прямої, що проходить через закріплені заряди.

4. Дві однаково заряджених кульки підвішені в одній точці на нитках однакової довжини. При цьому нитки розійшлися на кут α. Кульки занурюють в олію. Яка густина ρ олії, якщо кут розбіжності ниток при зануренні в олію залишається незмінним? Густина матеріалу кульок $\rho_0=1{,}5\cdot10^3$ кг/м^3, діелектрична проникність олії ε=2,2.

5. Чотири однакових заряди $Q_1=Q_2=Q_3=Q_4$=40нКл закріплені у вершинах квадрата зі стороною *a*=10 см. Знайти силу F, що діє на один з цих зарядів з боку трьох інших.

6. Точкові заряди Q_1=30мкКл і Q_2=-20мкКл перебувають на відстані d=20 см один від одного. Визначити напруженість електричного поля E в точці, віддаленій від першого заряду на відстань r_1=30 см, а від другого на r_2=15 см.

7. У вершинах правильного трикутника зі стороною *a*=10 см є заряди Q_1=10мкКл, Q_2=20мкКл і Q_3=30мкКл. Визначити силу F, що діє

на заряд Q_2 з боку двох інших зарядів.

8. У вершинах квадрата є однакові заряди $Q_1=Q_2=Q_3=Q_4=8\cdot10^{-10}$ Кл. Який негативний заряд Q потрібно помістити в центрі квадрата, щоб сила взаємного відштовхування позитивних зарядів була врівноважена силою притягання негативного заряду?

9. На відстані d=20 см є два точкових заряди: Q_1=-50 нКл і Q_2=100 нКл. Визначити силу F, що діє на заряд Q_3=-10 нКл, віддалений від обох зарядів на однакову відстань, рівну d.

10. Відстань d між двома точковими зарядами (Q_1=2нКл і Q_2=4нКл дорівнює 60 см. Визначити точку, в яку потрібно помістити третій заряд Q_3 так, щоб система зарядів була в рівновазі. Визначити заряд Q_3 і його знак. Стійка чи хитлива буде рівновага?

11. Тонкий стержень довжиною *l*=20см несе рівномірно розподілений заряд τ=0,1мкКл. Визначити напруженість E електричного поля, створеного розподіленим зарядом у точці A, що лежить на осі стержня на відстані *a*=20 см від його кінця.

12. По тонкому півкільцю радіуса *R*=10см рівномірно розподілений заряд з лінійною густиною τ=1мкКл/м. Визначити напруженість E електричного поля, створеного розподіленим зарядом у точці O, що збігається з центром кільця.

13. Тонке кільце несе розподілений заряд Q=0,2мкКл. Визначити напруженість E електричного поля, створеного розподіленим зарядом у точці A, рівновіддаленій від усіх точок кільця на відстань *r*=20см. Радіус кільця *R* =10см.

14. Третина тонкого кільця радіуса *R*=10 см несе розподілений заряд Q=50нКл. Визначити напруженість E електричного поля,

створеного розподіленим зарядом у точці О, що збігається з центром кільця.

15. Нескінченний тонкий стержень, обмежений з одного боку, несе рівномірно розподілений заряд з лінійною густиною τ=0,5мкКл/м. Визначити напруженість Е електричного поля, створеного розподіленим зарядом у точці А, що лежить на осі стержня на відстані *a*=20см від його початку.

16. По тонкому кільцю радіусом *R*=20см рівномірно розподілений з лінійною густиною τ=0,2 мкКл/м заряд. Визначити напруженість Е електричного поля, створеного розподіленим зарядом у точці А, що перебуває на осі кільця на відстані h=2*R* від його центра.

17. По тонкому півкільцю рівномірно розподілений заряд Q=20мкКл із лінійною густиною τ=0,1мкКл/м. Визначити напруженість Е електричного поля, створеного розподіленим зарядом у точці О, що збігається з центром кільця.

18. Чверть тонкого кільця радіусом *R*=10см несе рівномірно розподілений заряд Q=0,05мкКл. Визначити напруженість Е електричного поля, створеного розподіленим зарядом у точці О, що збігається з центром кільця.

19. По тонкому кільцю рівномірно розподілений заряд Q=10 нКл із лінійною густиною τ =0,01 мкКл/м. Визначити напруженість Е електричного поля, створеного розподіленим зарядом у точці А, що лежить на осі кільця і віддаленого від його центра на відстань, рівну радіусу кільця.

20. Дві третини тонкого кільця радіусом *R*=10 см несуть рівномірно розподілений з лінійною густиною τ=0,2мкКл/м заряд.

Визначити напруженість Е електричного поля, створеного розподіленим зарядом у точці О, що збігається з центром кільця.

21. На двох концентричних сферах радіусом R і $2R$ рівномірно розподілені заряди з поверхневою густиною σ_1 і σ_2 (рис. 24). Потрібно: 1) використовуючи теорему Остроградського-Гаусса, знайти залежність Е(r) напруженості електричного поля від відстані для трьох областей: *I*, *II* і *III*. Прийняти σ_1=4σ, σ_2=σ; 2) обчислити напруженість Е в точці, вилученій від центра на відстань r, і вказати напрямок вектора Е. Прийняти σ=30 нКл/м^2, r=1,5R; 3) побудувати графік Е(r).

22. Див. умову задачі 21. В п. 1 прийняти σ_1=σ_2=-σ. В п. 2 прийняти σ=0,1 мкКл/м^2, r=3.

23. Див. умову задачі 21. В п.1 прийняти σ_1=-4σ, σ_2= σ. В п. 2 прийняти σ=50нКл/м^2, r=1,5R.

24. Див. умову задачі 21. В п. 1 прийняти σ_1=-2σ, σ_2= σ. В п. 2 прийняти σ=0,1 мкКл/м^2, r=3R..

25. На двох нескінченних паралельних площинах рівномірно розподілені заряди з поверхневою густиною σ_1 і σ_2 (рис. 15). Потрібно: 1) використовуючи теорему Остроградського-Гаусса і принцип суперпозиції електричних полів, знайти вираз Е(x) напруженості електричного поля в трьох областях: *I*, *II* і *III*. Прийняти σ_1=2σ, σ_2=σ; 2) обчислити напруженість Е поля в точці, розташованій ліворуч від площин, і вказати напрямок вектора Е; 3) побудувати графік Е(x).

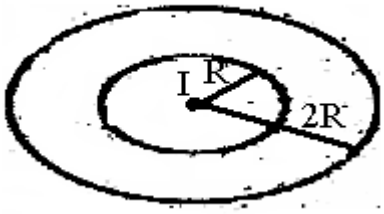

Рис. 15

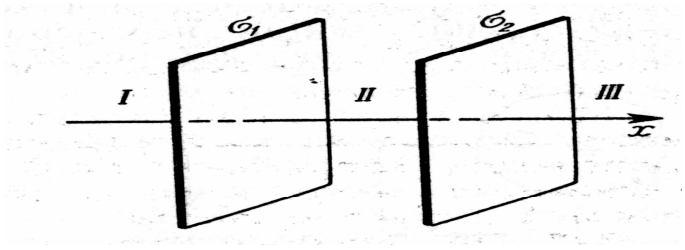

Рис. 16

26. Див. умову задачі 25. У п. 1 прийняти σ_1=-4σ, σ_2=2σ. У п. 2 прийняти σ=40 нКл/м^2 і точку розташувати між площинами (рис.16)

27. Див. умову задачі 25. У п. 1 прийняти σ_1=σ, σ_2=-2σ. У п. 2 прийняти σ=20 нКл/м^2 і точку розташувати справа від площин (рис.16).

28. На двох коаксіальних нескінченних циліндрах радіусами *R* і 2*R* рівномірно розподілені заряди з поверхневою густиною σ_1 і σ_2 (рис. 17). Потрібно: 1) використовуючи теорему Остроградського-Гаусса; знайти залежність E(*r*) напруженості електричного поля від відстані для трьох областей: *I*, *II*, *III*. Прийняти σ_1=-2σ, σ_2=σ; 2) обчислити напруженість E в точці, вилученій від осі циліндрів на відстань *r*, і вказати напрямок вектора E. Прийняти σ=50 нКл/м^2, *r*=1,5*R*;

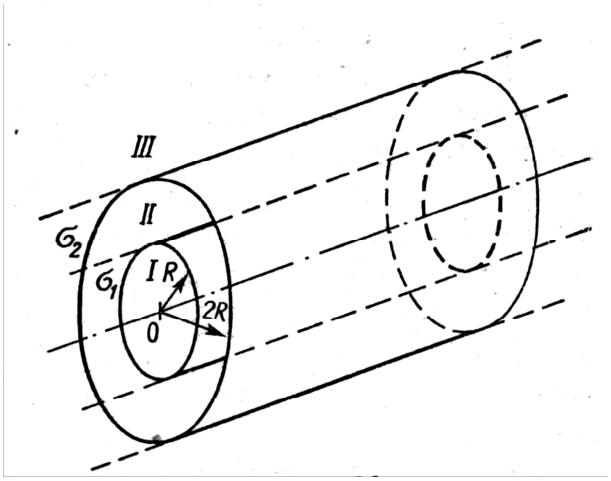

Рис. 17

3) побудувати графік E(*r*).

29. Див. умову задачі 28. У п. 1 прийняти σ_1=σ, σ_2 =- σ. У п. 2 прийняти σ=60 нКл/м^2, *r*=3R.

30. Див. умову задачі 328. У п. 1 прийняти $\sigma_1=-\sigma$, $\sigma_2=4\sigma$. У п. 2 прийняти $\sigma=30$ нКл/м^2, $r=4R$.

31. Два точкових заряди $Q_1=6$ нКл і $Q_2=3$ нКл перебувають на відстані d=60 см один від одного. Яку роботу необхідно зробити зовнішнім силам, щоб зменшити відстань між зарядами вдвічі?

32. Електричне поле створене зарядженою провідною кулею, потенціал φ якої 300В. Визначити роботу сил поля з переміщеннязаряду φ=0,2мкКл із точки 1 у точку 2 (рис. 18).

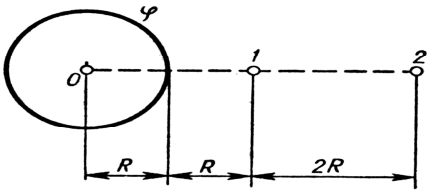

Рис. 18

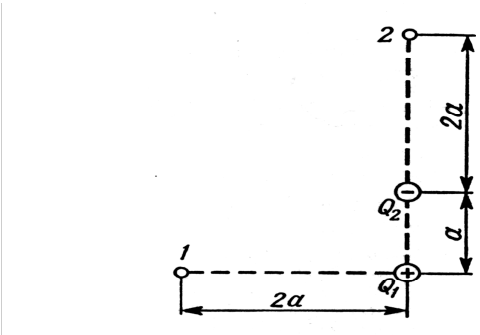

Рис. 19

33. Електричне поле створене зарядами $Q_1=2$мкКл, $Q_2=-2$мкКл, що знаходяться на відстані $a=10$см один від одного. Визначити роботу сил поля, при переміщенні заряду Q=0,5мкКл із точки 1 у точку 2 (рис. 19).

34. Дві паралельно заряджені площини, з поверхневою густиною заряду $\sigma_1=2$мкКл/м^2 і $\sigma_2=-0{,}8$мкКл/м^2, знаходяться на відстані d=0,6 см одна від одної. Визначити різницю потенціалів U між площинами.

35. Диполь з електричним моментом $p=100$пКл·м вільно установився у вільному електричному полі напруженістю E=200кВ/м. Визначити роботу зовнішніх сил, яку необхідно затрати для повороту диполя на кут α=180°.

36. Чотири однакових краплі ртуті, заряджених до потенціалу

φ=10В, зливаються в одну. Який потенціал φ_1 краплі, що утворилася?

37. Тонкий стержень зігнутий у кільце радіусом R=10 см. Він рівномірно заряджений з лінійною густиною заряду τ=800нКл/м. Визначити потенціал φ у точці, розташованій на осі кільця на відстані h=10см від його центра.

38. Поле утворене точковим диполем з електричним моментом p=200пКл·м. Визначити різницю потенціалів U двох точок поля, розташованих симетрично до диполя на його осі на відстані r=40см від центра диполя.

39. Електричне поле утворене нескінченно довгою зарядженою ниткою, лінійна густину заряду якої τ=20пКл/м. Визначити різницю потенціалів U двох точок поля, що знаходять від нитки на відстані r_1=8 см і r_2=12 см.

40. Тонка квадратна рамка рівномірно заряджена з лінійною густиною заряду τ=200пКл/м. Визначити потенціал φ поля в точці перетину діагоналей.

41. Порошина масою m=200мкг, що несе на собі заряд Q=40нКл, влетіла в електричне поле в напрямку силових ліній. Після проходження різниці потенціалів U=200 В порошина мала швидкість υ=10м/с. Визначити швидкість υ_0 порошини до того як вона влетіла в поле.

42. Електрон, що мав кінетичну енергією T=10еВ, влетів у однорідне електричне поле в напрямку силових ліній. Яку швидкість буде мати електрон, пройшовши в цьому полі різницю потенціалів U=8В?

43. Знайти відношення швидкостей іонів Cu^{2+} і K^{+}, що пройшли

однакову різницю потенціалів.

44. Електрон з енергією T=400 еВ (у нескінченності) рухається уздовж силової лінії в напрямку до поверхні металевої зарядженої сфери радіусом R =10 см. Визначити мінімальну відстань a, на яку наблизиться електрон до поверхні сфери, якщо заряд її Q=-10 нКл.

45. Електрон, пройшовши в плоскому конденсаторі шлях від однієї пластини до іншої, набув швидкості υ=105 м/с. Відстань між пластинами d=8 мм. Знайти: 1) різницю потенціалів U між пластинами; 2) поверхневу густину заряду σ на пластинах.

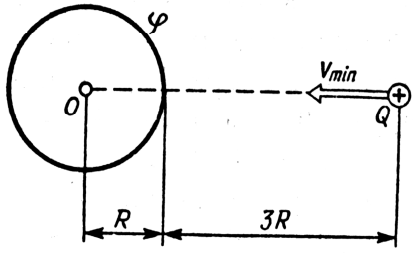

Рис. 20

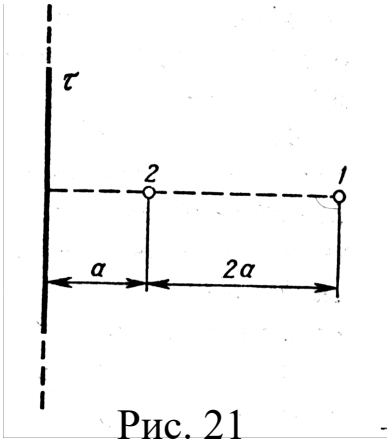

Рис. 21

46. Порошина масою m=5нг, що несе на собі N=10 електронів, пройшла у вакуумі прискорюючу різницю потенціалів U=1МВ. Яка кінетична енергія T порошини? Якої швидкості υ набула порошина?

47. Яку мінімальну швидкість υ_{min} повинен мати протон, щоб він міг досягти поверхні металевої кулі, зарядженої до потенціалу φ =400 В (рис. 20)?

48. У однорідне електричне поле напруженістю E=200В/м влітає (вздовж силової лінії) електрон зі швидкістю υ_0=2Мм/с. Визначити відстань l, що пройде електрон до точки, в якій його швидкість буде дорівнювати половині початкової.

49. Електричне поле створене нескінченною зарядженою прямою лінією з рівномірно розподіленим зарядом (τ=10нКл/м). Визначити кінетичну енергію T_2 електрона в точці 2, якщо в точці 1 його кінетична енергія T_1=200 еВ (рис. 21).

50. Електрон рухається вздовж силової лінії однорідного електричного поля. У деякій точці поля з потенціалом φ_1=100 В електрон мав швидкість υ_1=6Мм/с. Визначити потенціал φ_2 точки поля, дійшовши до якого електрон втратить половину своєї швидкості.

51. Конденсатори ємністю C_1=5 мкФ і C_2=10 мкФ заряджені до напруг U_1=60В і U_2=100В відповідно. Визначити напругу на обкладках конденсаторів після їхнього з'єднання обкладками, що мають однойменні заряди.

52. Конденсатор ємністю C_1=10 мкФ заряджений до напруги U=10В. Визначити заряд на обкладках цього конденсатора після того, як паралельно йому було підключено інший, незаряджений, конденсатор ємністю C_2=20 мкФ.

53. Конденсатори ємностями C_1=2 мкФ, C_2=5 мкФ і C_3=10 мкФ з'єднані послідовно і перебувають під напругою U=850В. Визначити напругу і заряд на кожному з конденсаторів.

54. Два конденсатори ємностями C_1=2мкФ і C_2=5мкФ заряджені до напруг U_1=100В и U_2=150В відповідно. Визначити напругу на обкладках конденсаторів після їхнього з'єднання обкладками, що мають різнойменні заряди.

55. Два однакових плоских повітряних конденсатори ємністю C=100пФ кожний з'єднані в батарею послідовно. Визначити, на скільки зміниться ємність C батареї, якщо простір між пластинами одного з

конденсаторів заповнити парафіном.

56. Два конденсатори ємностями C_1=5мкФ і C_2=8мкФ з'єднані послідовно і приєднані до батареї з ЕРС ε=80В. Визначити заряди Q_1 і Q_2 конденсаторів і різниці потенціалів U_1 і U_2 між їхніми обкладками.

57. Плоский конденсатор складається з двох круглих пластин радіусом *R*=10см кожна. Відстань між пластинами d=2мм. Конденсатор приєднаний до джерела напруги U=80В. Визначити заряд Q і напруженість E поля конденсатора в двох випадках: а) діелектрик - повітря; б) діелектрик - скло.

58. Дві металеві кульки радіусами R_1=5см і R_2=10см мають заряди Q_1=40нКл і Q_2=-20нКл відповідно. Знайти енергію W, що виділиться при розряді, якщо кулі з'єднати провідником.

59. Простір між пластинами плоского конденсатора заповнено двома шарами діелектрика: скла товщиною d_1=0,2 см і шаром парафіну товщиною d_2=0,3см. Різниця потенціалів між обкладками U=300В. Визначити напруженість E поля і падіння потенціалу в кожному із шарів.

60. Плоский конденсатор із площею пластин S=200см^2 кожна заряджений до різниці потенціалів U=2кВ. Відстань між пластинами d=2 см. Діелектрик — скло. Визначити енергію W поля конденсатора і густину енергії ω поля.

61. Котушка і амперметр з'єднані послідовно і підключені до джерела струму. До клем котушки приєднано вольтметр з опором *r*=4кОм. Амперметр показує силу струму *I*=0,3А, вольтметр - напругу *U*=120В. Визначити опір *R* котушки. Визначити відносну похибку ε, яка буде допущена за виміру опору, якщо знехтувати силою струму, що

тече через вольтметр.

62. ЕРС батареї ε=80 В, внутрішній опір R_i=5Ом. Зовнішній ланцюг споживає потужність P=100Вт. Визначити силу струму I у ланцюгу, напругу U, під яким перебуває зовнішній ланцюг, і її опір R.

63. Від батареї, ЕРС якої ε=600В, потрібно передати енергію на відстань l=1км. Споживана потужність P=5кВт. Знайти мінімальні втрати потужності в мережі, якщо діаметр підвідних мідних проводів, d=0,5см.

64. За зовнішнього опору R_1=8Ом сила струму в ланцюзі I_1=0,8А, за опору R_2=15Ом сила струму I_2=0,5А, Визначити силу струму $I_{к.з.}$ короткого замикання джерела ЕРС.

65. ЕРС батареї ε=24В. Найбільша сила струму, що може дати батарея, I_{max}=10А. Визначити максимальну потужність P_{max}, що може виділятися в зовнішньому ланцюзі.

66. Акумулятор з ЕРС ε=12В заряджається від мережі постійного струму з напругою U=15В. Визначити напругу на клемах акумулятора, якщо його внутрішній опір R_i=10 Ом.

67. Від джерела з напругою U=800В необхідно передати споживачу потужність P =10кВт на деяку відстань. Який найбільший опір може мати лінія передачі, щоб втрати енергії в ній не перевищували 10% від переданої потужності?

68. За включення електродвигуна в мережу з напругою U=220В він споживає струм I=5А. Визначити потужність, споживану двигуном, і його КПД, якщо опір R обмотки двигуна дорівнює 6 Ом.

69. У мережу з напругою U=100 В підключили котушку з опором R_1=2кОм і вольтметр, з'єднані послідовно. Показання вольтметра

U_1=80В. Коли котушку замінили іншою, вольтметр показав U_2=60В. Визначити опір R_2 іншої котушки.

70. ЕРС батареї ε=12 В. За сили струму I=4А ККД батареї - η=0,6. Визначити внутрішній опір R_i батареї.

71. За час t=20с при рівномірно зростаючій силі струму від нуля до деякого максимуму в провіднику опором R=5Ом виділилася кількість теплоти Q=4кДж. Визначити швидкість наростання сили струму, якщо опір провідника R=5Ом.

72. Сила струму в провіднику змінюється з часом за законом $I = I_0 e^{-\alpha t}$, де I_0=20А, α=10^2с$^{-1}$. Визначити кількість теплоти, що виділилася в провіднику за час t=10^{-2}с.

73. Сила струму в провіднику опором R=10Ом за час t=50с рівномірно наростає від I_1=5А до I_2=10А. Визначити кількість теплоти Q, що виділилася за цей час у провіднику.

74. У провіднику за час t=10с за рівномірного зростання сили струму від I_1=1А до I_2=2А виділилася кількість теплоти Q=5кДж. Знайти опір R провідника.

75. Сила струму в провіднику змінюється з часом за законом $I = I_0 \sin \omega t$. Знайти заряд Q, що проходить через поперечний переріз провідника за час t, рівний половині періоду T, якщо початкова сила струму I_0=10А, циклічна частота ω=50πс$^{-1}$.

76. За час t=10с за рівномірно зростаючої сили струму від нуля до деякого максимуму в провіднику виділилася кількість теплоти Q=40кДж. Визначити середню силу струму -I; у провіднику, якщо його опір R=25 Ом.

77. За час t=8с за рівномірно зростаючої сили струму в провіднику

опором R=8Ом виділилася кількість теплоти Q=500Дж. Визначити заряд q, що проходить у провіднику, якщо сила струму в початковий момент часу дорівнює нулю.

78. Визначити кількість теплоти Q, що виділилася за час t=10с у провіднику опором R=10Ом, якщо сила струму в ньому, рівномірно зменшуючись, змінилася від I_1=10 А до I_2=0.

79. Сила струму в ланцюзі змінюється за законом $I = I_0 \sin \omega t$. Визначити кількість теплоти, що виділиться в провіднику опором R=10Ом за час, рівний чверті періоду (від t_1=0 до t_2=T/4, де T=10 с).

80. Сила струму в ланцюзі змінюється з часом за законом $I = I_0 e^{-\alpha t}$. Визначити кількість теплоти, що виділиться в провіднику опором R=20Ом за час, протягом якого струм зменшиться в е разів. Коефіцієнт α прийняти рівним $2 \cdot 10^{-2} c^{-1}$.

81. Відстань між зарядами Q_1=100нКл і Q_2=-50 нКл дорівнює d=10 см. Визначити силу F, яка діє на заряд Q_3=1мкКл, що перебуває на відстані на r_1=12 см від заряду Q_1 і на r_2=10 см від заряду Q_2.

82. Тонкий довгий стержень рівномірно заряджений з лінійною густиною τ=1,5нКл/см. На продовженні осі стержня на відстані d=2 см від його кінця є точковий заряд Q=0,2мкКл. Визначити силу взаємодії зарядженого стержня і точкового заряду.

83. Довгий прямий тонкий дріт несе рівномірно розподілений заряд. Обчислити лінійну густину τ заряду, якщо напруженість поля на відстані r=0,5 м від дроту проти його середини E=2 В/см.

84. З якою силою, що випадає на одиницю площі, відштовхуються дві однойменно заряджені нескінченно протяжні площини з однаковою поверхневою густиною заряду σ=2 мкКл/м^2?

85. Яку прискорюючу різницю потенціалів U має пройти електрон, щоб мати швидкість V =8 Мм/с?

86. Заряд рівномірно розподілений по нескінченній площині з поверхневою густиною σ=10нКл/м^2. Визначити різницю потенціалів двох точок поля, одна з яких є на площині, а інша віддалена від неї на відстань *a*=10 см.

87. Електрон з початковою швидкістю υ=3 Мм/с влетів в однорідне електричне поле напруженістю E=150В/м. Вектор початкової швидкості перпендикулярний лініям напруженості електричного поля. Визначити: 1) силу, що діє на електрон; 2) прискорення, що здобувається електроном; 3) швидкість електрона через t=0,1 мкс.

88. До батареї з ЕРС ε=300 В підключені два плоских конденсатори ємностями C_1=2 пФ і C_2=3 пФ. Визначити заряд Q і напругу U на пластинках конденсаторів за послідовного і паралельного з'єднаннях.

89. Конденсатор ємністю C_1=600 пФ зарядили до різниці потенціалів U_1=1,5 кВ і відключили від джерела напруги. Потім до нього паралельно приєднали незаряджений конденсатор ємністю C_2=400 пФ. Визначити енергію, витрачену на утворення іскри, що проскочила при з'єднанні конденсаторів.

90. На кінцях мідного дроту довжиною *l*=5 м підтримується напруга U=l В. Визначити густину струму в дроті.

ДОДАТКИ

1 . Основні фізичні постійні (округлені значення)

Фізична постійна	Позначення	Значення
Нормальне прискорення вільного падіння	g	9,81 м/с^2
Гравітаційна постійна	G	$6{,}67\cdot10^{-11}$Н·м^2/кг^2
Постійна Авогадро	N_A	6,02 10^{23}моль$^{-1}$
Молярна газова стала	R	8,31Дж/(моль К)
Стандартний об’єм	V_m	22,4 10^{-3}м^3/моль
Постійна Больцмана	k	1,38 10^{-23}Дж/К
Елементарний заряд	e	1,60 10^{-19}Кл
Швидкість світла у вакуумі	c	3,00 10^8м/с
Постійна Стефана – Больцмана	σ	5,67 10^{-8}Вт/(м^2 К^4)
Постійна закону зсуву Віна	b	2,90 10^{-3} м К
Постійна Планка	h	6,63 10^{-34}Дж с
Постійна Ридберга	R_∞	10973731,77 м$^{-1}$
Радіус Бора	a	0,529 10^{-10} м
Комптонівська довжина хвилі електрона	λ_e	2,43 10^{-12}м
Магнетон Бора	$\mu_в$	0,927 10^{23} А м^2
Енергія іонізації атома водню	E_i	2,18 10^{-18}Дж(13,6еВ)
Атомна одиниця маси	а.о.м.	1,660 10^{-12}Ф/м
Електрична постійна	ε_0	8,85 10^{-12}Ф/м
Магнітна постійна	μ_0	4π 10^{-7}Гн/м

2 . Деякі астрономічні величини

Найменування	Значення
Радіус Землі	$6{,}37\ 10^{6}$ м
Маса Землі	$5{,}98\ 10^{24}$ кг
Радіус Сонця	$6{,}95\ 10^{8}$ м
Маса Сонця	$1{,}98\ 10^{30}$ кг
Радіус Місяця	$1{,}74\ 10^{6}$ м
Маса Місяця	$7{,}33\ 10^{22}$ кг
Відстань від центру Землі до центру Сонця	$1{,}49\ 10^{11}$ м
Відстань від центру Землі до центру Місяця	$3{,}84\ 10^{8}$ м

3 . Густина твердих тіл

Тверде тіло	Густина, кг/м^3	Тверде тіло	Густина, кг/м^3
Алюміній	$2{,}70\ 10^{3}$	Мідь	$8{,}93\ 10^{3}$
Барій	$3{,}50\ 10^{3}$	Нікель	$8{,}90\ 10^{3}$
Ванадій	$6{,}02\ 10^{3}$	Свинець	$11{,}3\ 10^{3}$
Вісмут	$9{,}80\ 10^{3}$	Срібло	$10{,}5\ 10^{3}$
Залізо	$7{,}88\ 10^{3}$	Цезій	$1{,}90\ 10^{3}$
Літій	$0{,}53\ 10^{3}$	Цинк	$7{,}15\ 10^{3}$

4 . Густина рідин

Рідина	Густина, кг/м^3	Рідина	Густина, кг/м^3
Вода (при 4^0С)	$1{,}00\ 10^{3}$	Сірковуглець	$1{,}26\ 10^{3}$
Гліцерин	$1{,}26\ 10^{3}$		
Ртуть	$13{,}6\ 10^{3}$	Спирт	$0{,}80\ 10^{3}$

5 . Густина газів (за нормальних умовх)

Газ	Густина, кг/м^3	Газ	Густина, кг/м^3
Водень	0,09	Гелій	0,18
Повітря	1,29	Кисень	1,43

6. Ефективний діаметр молекули

Газ	Діаметр, м	Газ	Діаметр, м
Азот	$3{,}0\ 10^{-10}$	Гелій	$1{,}9\ 10^{-10}$
Водень	$2{,}3\ 10^{-10}$	Кисень	$2{,}7\ 10^{-10}$

7. Маси атомів легких ізотопів

Ізотоп	Символ	Маса а.о.м.	Ізотоп	Символ	Маса а.о.м.
Нейтрон	${}^{1}_{0}n$	1,00867	Берилій	${}^{7}_{4}Be$ ${}^{9}_{4}Be$	7,01693 9,01219
Водень	${}^{1}_{1}H$ ${}^{2}_{1}H$	1,00783 2,01410	Бор	${}^{10}_{5}B$ ${}^{11}_{5}B$	10,01294 11,00930
Гелій	${}^{3}_{2}He$ ${}^{4}_{2}He$	3,01605 4,00260	Вуглець	${}^{14}_{6}C$ ${}^{13}_{6}C$	12,00000 13,00335
Літій	${}^{6}_{3}Li$ ${}^{7}_{3}Li$	6,01513 7,01601	Азот Кисень	${}^{14}_{7}N$ ${}^{16}_{8}O$ ${}^{17}_{8}O$	14,00307 15,99491 16,99913

8. Періоди напіврозпаду радіоактивних ізотопів

Ізотоп	Символ	Період напіврозпаду
Актиній	${}^{225}_{89}Ac$	10 діб
Йод	${}^{131}_{53}I$	8 діб
Кобальт	${}^{60}_{27}Co$	5,3 року
Магній	${}^{27}_{12}Mg$	10хв
Радій	${}^{226}_{86}Ra$	1626 років
Радон	${}^{222}_{86}Rn$	3,8доби
Стронцій	${}^{90}_{38}Sr$	27 років
Фосфор	${}^{32}_{15}P$	14,3 доби
Церій	${}^{144}_{58}Ce$	285 діб

СПИСОК ВИКОРИСТНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Загальна фізика. Оптика : оглядові лекції / уклад. В. М. Кадченко. Кривий Ріг : КДПУ, 2020. 70 с. URL: http://elibrary.kdpu.edu.ua/bitstream/123456789/4159/1/ДЕК_ОГЛЯДОВІ%20ЛЕКЦІЇ_2.pdf
2. Коваленко В. Ф. Загальна фізика в прикладах, запитаннях і відповідях. Механіка : навчальний посібник. Київ : Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2011. 223 с. URL: http://rex.knu.ua/wp/wp-content/uploads/2017/10/Kovalenko_Mechanics.pdf
3. Конспект з фізики для студентів скороченої форми навчання / уклад. О. Крамар. Тернопіль : Центр оперативної поліграфії, 2018. 128 с. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/27376/1/metod_AT_preprint.pdf
4. Коцюбинський В. О., Бойчук В. М. Фізика (вибрані питання) : курс лекцій. Івано-Франківськ :ДВНЗ "Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника", 2021. 309 с. URL: http://lib.pnu.edu.ua:8080/bitstream/123456789/9429/1/Фізика%20вибрані%20питання%29.pdf
5. Коцюбинський В. О., Бойчук В. М. Фізика : курс лекцій. Івано-Франківськ :ДВНЗ "Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника", 2020. 310 с. URL: http://lib.pnu.edu.ua:8080/bitstream/123456789/6649/1/Курс%20лекцй_фізика.pdf
6. Лекції з курсу загальної фізики . Розділ І. Механіка / уклад. М. І. Правда. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 55 с. URL: http://eir.zntu.edu.ua/bitstream/123456789/7495/1/MV_Pravda.pdf
7. Лекції з курсу загальної фізики. Розділ IV. Хвильова оптика / уклад. М. І. Правда. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 20 с. URL: http://eir.zntu.edu.ua/bitstream/123456789/7498/1/MV_Pravda.pdf
8. Лекції з курсу загальної фізики. Розділ II. Молекулярна фізика та термодинаміка / уклад. М. І. Правда. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 36 с. URL: http://eir.zntu.edu.ua/bitstream/123456789/7496/1/MV_Pravda.pdf
9. Лекції з курсу загальної фізики. Розділ III. Електрика та магнетизм / уклад. М. І. Правда. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 56 с. URL: http://eir.zntu.edu.ua/bitstream/123456789/7497/1/MV_Pravda.pdf
10. Огороднiков В. А., Федотов В. О., Перлов В. Є. Теоретична механіка. Кінематика : конспект лекцій. Вінниця : ВНТУ, 2015. 69 с. URL: https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/18337/TM_kin_kl.PDF?sequence=1
11. Огороднiков В. А., Федотов В. О., Кириця І. Ю. Теоретична механіка. Динаміка : конспект лекцій. Вінниця : ВНТУ, 2016. 84 с. URL: https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/18336/Конспект_лекцій_Динаміка_Кириця.PDF?sequence=1&isAllowed=y
12. Павло В. Фізика. Основи і механічний рух : підручник. Одеса : Book Chef, 2020. 384 с.
13. Прокопів В. В. Конспекти лекцій з молекулярної фізики. Івано-Франківськ : Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, 2017. 76 с. URL: http://lib.pnu.edu.ua:8080/bitstream/123456789/3745/1/Konspekt-FF_Knyga.pdf
14. Русаков В. Ф. Фізичні основи механіки: навчальний посібник. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 144 с. URL:

https://r.donnu.edu.ua/bitstream/123456789/113/1/84_%20Русаков%20В.Ф.%20Механіка.pdf

15. Янг Г., Фрідман Р., Сендін Т., Форд Л. Фізика для університетів з розділами сучасної фізики. Львів : Наутілус, 2009. 1600 с.

16. Calculation of Optimal Geometric Parameters Electrical Apparatus for Controlling the Irrigation System / O. Sadovoy et al. 2023 *IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 27–30 September 2023. 2023. URL: https://doi.org/10.1109/mees61502.2023.10402456

17. Comparison of Active Power Losses of Single-Phase Electromagnetic Static Devices by Radial Electromagnetic System / O. Sadovoy et al. *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 20–23 October 2022. 2022. URL: https://doi.org/10.1109/mees58014.2022.10005760

18. Technological Parameters Of The Magnetic Circuit Of The Compact Transformer For Aggregate Electric Drive / E. Avdieieva et al. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, Kremenchuk, Ukraine, 2020, pp. 1-4, DOI: https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240779.

19. Development of a Model of Cell Functioning to Measure the Interaction of Low-Energy EMF / M. Kundenko et al. *2022 XXXII International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA)*, Sozopol, Bulgaria, 7–11 September 2022. 2022. DOI: https://doi.org/10.1109/mma55579.2022.9993093.

Навчальне видання

ФІЗИКА.
Модуль 4 «Електростатика. Постійний електричний струм»

Методичні рекомендації

Укладачі: **Вахоніна** Лариса Володимирівна

Формат 60х84 1/16. Ум. друк. арк. 4,3.
Тираж 20 прим. Зам. №_____

Надруковано у видавничому відділі
Миколаївського національного університету
54020, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9

Свідоцтво суб’єкта видавничої справи ДК № 4490 від 20.10.2013р.