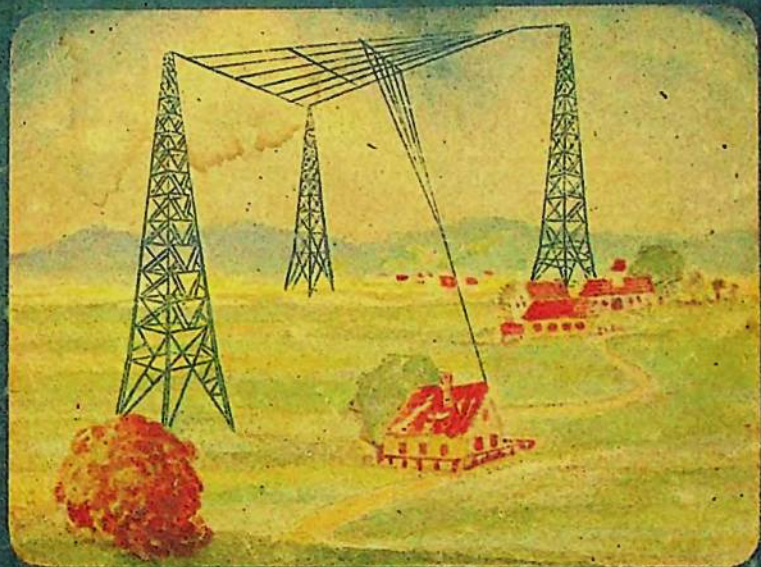


ПРОФ. И. СОКОЛОВ



КУРС ФИЗИКИ

Проф. І. І. СОКОЛОВ

# КУРС ФІЗИКИ

*ЧАСТИНА ТРЕТЯ*

ЕЛЕКТРИКА ОПТИКА

ПІДРУЧНИК ДЛЯ ГІМНАЗІЇ

---

Видавництво „РІДНА ШКОЛА“

Гашовер 1948



# ЕЛЕКТРИКА.

---

## ВСТУП.

XX вік уже давно дістав назву віку електрики, змінивши собою вік пари — XIX вік.

Ця назва показує, що електрична енергія тепер є основною формою, в якій техніка використовує енергію.

Розвиток учення про електрику глибоко змінив наукове уявлення про будову матерії. Тепер в науці основне значення має так звана електронна теорія, за якою атом кожного хімічного елементу складається з частинок, що мають електричні властивості. Пояснення явищ молекулярної фізики все в більшій мірі спирається на електричну теорію будови речовини.

З наведених міркувань про значення електрики випливає величезна важливість вивчення цього відділу фізики.

## I. ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ.

1. Електризація тертям. З дуже давніх часів відома властивість натертих об шерсть або шкіру кусків янтарю (янтар — один з видів смоли) притягати легкі тіла — пушинки, волосинки, шерстинки тощо. Про це явище уже за 2500 років до нашого часу знав грецький філософ Фалес Мілетський (640 — 550 рр. до н. е.); від нього ці відомості перейшли в праці пізніших грецьких учених.

Після Фалеса понад 2000 років це явище залишалось невивченим і невикористаним, поки до нього не повернувся на рубежі XVII століття англійський лікар і фізик Джільберт (в латинській вимові Гільберт).

На той час, через широкий розвиток торгового мореплавства, що користувалося для орієнтування у відкритому морі компасом, дуже сильно зросла потреба у вивченні магнітних явищ. Джіль-

берт в 1600 р. випустив книгу „Про магніт“ („De Magnete“), в якій зібрав усі відомості, що були на той час про магніти, і доповнив їх рядом самостійних дослідів і теоретичних міркувань. Він не міг не звернути уваги на відміну притягань, спричинюваних кусками залізної руди і кусками натертого янтарю.

Через те що по-грецькому янтар називається електрон, то причину притягання тіл натертим янтарем він назвав електричною силою. Так

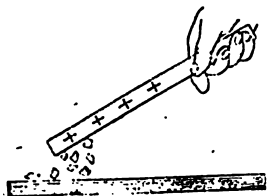


Рис. 1. Натерта шкірою скляна паличка притягує легкі тіла.

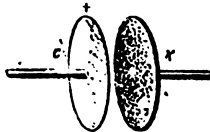


Рис. 2. При терті одночасно електризуються обидва тіла.

Крім того, Джільберт установив, що не тільки янтар, а й багато інших тіл від тертя набувають здатності притягати легкі тіла.

Справді, легко виявити, що натерті шкірою або сукном скляна, ебонітова, сургучна палички або кусочки сірки, кришталю та інші тіла, піднесені до дрібно нарізаних кусочків паперу (рис. 1), притягнуть їх.

Надання тілам через тертя здатності притягати називається електризацією тіла. Самі тіла, що набули такої здатності, називаються наелектризованими, або такими, що мають електричний заряд.

2. Одночасна електризація обох натираних тіл. В терті беруть участь завжди два тіла. Чи обидва вони електризуються? Для досліду, що відповідає на це питання, треба взяти два однакових скляних круги на скляних рукоятках (рис. 2) і на одні з них  $K$  наклеїти шкiряний круг, вкритий цинковою амальгамою<sup>1</sup>.

Якщо тепер потерти ці круги один об другий і піднести кожний окремо до легких тіл, то той і другий круги притягують ці предмети і виявляють, таким чином, те, що вони знаходяться в стані електризації. Але якщо піднести до легких предметів обидва натертих круги разом, не розсуваючи їх один від одного, то ніяк до притягання не виявляється, їх дії взаємно знищуються.

Цей дослід приводить до висновку, що існують різномірні щодо своїх властивостей електричні стани, або електричні заряди. Через те що досліди, подібні до описаних, можна зробити з будь-якими парами тіл, то з них випливає такий висновок: *при терті обидва тіла електризуються одночасно різномірними електриками в рівних кількостях.*

Різномірність зарядів, що їх дістаємо при терті різних тіл, вперше підмітив в 1733 р. французький фізик Дюфе (1698 — 1739). Грунтуючись на тому, що діяння різномірних електрик

<sup>1</sup> Амальгамою називається сполу металів з ртуттю або розчин металів у ртуті.

можуть взаємно зрівнюватися, подібно до того як можуть взаємно „знищуватися“ додатні і від'ємні числа, американський учений Франклін в 1747 р. назвав електрику, що утворюється при терті на склі, позитивною, а на шкірі або смолі — негативною.

Який заряд утворюється на даному тілі при терті об друге тіло, залежить від стану поверхні обох тіл, від способу обробки їх і від інших, часто невияснених причин. Найбільш певно утворюється позитивний заряд на склі, натертому об амальгамовану шкіру, і негативний — на ебоніті натертому об хутро.

3. Електризація через дотик до зарядженого тіла. В 1729 р. англієць Грей, повторюючи досліди з електризацією скляної трубки, помітив, що ту ж здатність притягати пухлячки та інші легкі тіла дістала і пробка, якою він заткнув скляну трубку, щоб захистити її від пилу.

Виріжемо легку кульку з корку, серцевини соняшника, бузини або візьмемо жмутик паперу і підвісимо їх на шовковій нитці до штатива (рис. 3). Наелектризувавши тертям, наприклад, скляну паличку, піднесемо її до кульки: кулька спершу притягнеться до наелектризованої палички, потім, доторкнувшись до неї, відштовхнеться. Після цього вона притягатиме легкі кусочки паперу, тобто буде наелектризованою. Отже, *електричний стан може бути переданий від наелектризованого тіла іншому через їх дотик.*

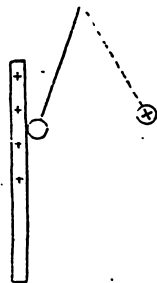


Рис. 3. Електризація паперової кульки через дотик.

4. Електропровідність. Досліди привели Грея до уявлення про те, що електричний стан можна передати від одного тіла іншому і через проміжне тіло, але ця передача в різних речовинах відбувається по-різному. Через десять років після описаного вище досліду було запроваджено термін провідник електрики і проведено поділ тіл на провідники і непровідники.

Провідником називається тіло, по якому електричний заряд швидко поширюється від місця його утворення (тертям або дотиком) по всьому провіднику. Непровідником, або ізолятором, називається тіло, в якому електричний заряд лишається на місці його збудження.

*Провідники:* метали, вугілля, розчини солей і кислот, людське тіло, земля, газі, молекули яких розщеплені певним способом.

*Непровідники:* скло, парафін, смоли, зокрема каучук, сірка, шовк, більшість кристалів, фарфор, масла, пара і газі з нерозщепленими молекулами, безповітряний простір.

Між цими групами може бути розташована значна група тіл із здатністю повільно передавати електричний стан. Такі тіла називаються *півпровідниками*.

*Півпровідники:* спирт, ефір, сухе дерево, папір, солома, шифер, мармур та ін.

Треба мати на увазі, що наведений вище поділ тіл умовний. Різкої межі між провідними і непровідними тілами, або ізоляторами, немає.

При всіх спробах з електризацією тертям або дотиком тіла, на яких хочуть зберегти електричний заряд, повинні бути старанно ізольовані від землі. Всі підставки і підвіси для наелектризованих тіл повинні бути зроблені з добрих ізоляторів і добре висушені для усунення слідів вологи, яка їх покриває і яка з слідами розчинених в ній речовин є провідником.

На цій же підставі не можна наелектризувати тертям провідник, якщо тримати його безпосередньо в руці. Якщо до провідника, наприклад, металічної палички, приробити ізоляційну ручку і потерти метал об сукино, то він наелектризується. Очевидно, в першому випадку заряд, збуджуваний у провіднику тертям, зникає з нього, ідучи через руку в землю.

На підставі дослідів можна твердити, що *всі тіла можуть бути наелектризовані тертям*.

**5. Взаємодія наелектризованих тіл. Електроскоп.** Якщо зарядити дві бузинові кульки, підвішені на шовкових нитках, позитивною електрикою, а дві інші кульки — негативною, то при

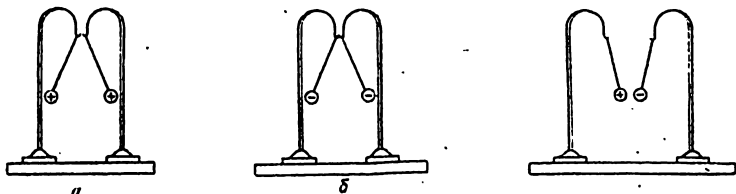


Рис. 4. Взаємодія наелектризованих тіл.

зближенні перших двох кульок (рис. 4, а) або других двох кульок (рис. 4, б) можна спостерігати їх відштовхування; але при

наближенні кульки, зарядженої позитивно, до кульки, зарядженої негативно (рис. 4, в), спостерігається притягання. Звідси висновок: *тіла, наелектризовані однією меншми електриками, відштовхуються, наелектризовані різної меншми — притягуються*.

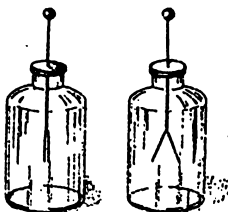


Рис. 5. Електроскоп.

На взаємодії наелектризованих тіл заснована будова електроскопа (рис. 5) — прилада, що виявляє існування електричного заряду на тілі.

Один з видів електроскопів — електроскоп з листочками<sup>1</sup> — складається з металічного стрижня, на верхньому кінці якого закріплена металічна кулька, а на нижньому містяться на стрі-

<sup>1</sup> Електроскоп з листочками або бузиновими кульками винайшов Кантон близько 1759 р.

мінцях легкі листочки. Стрижень через ізоляційну пробку проходить всередину металічної посудини з скляними віконцями (іноді всередину скляної посудини). Наявність електричного заряду на досліджуваному тілі електроскоп виявляє тим, що при дотику випробуваного тіла до кульки електроскопа його листочки розходяться. (Чому?) Знак невідомого заряду досліджують так. Зарядивши цим зарядом електроскоп, повільно наближають до нього позитивно заряджене тіло, наприклад скляну паличку, натерту об амальгамовану шкіру. Якщо листочки розходяться ще більше,— заряд електроскопа позитивний, якщо сходяться, то негативний. Можна також дослідити заряд і за допомогою піднесуваного негативно зарядженого тіла.

Це правило встановлюють на підставі попередньої спроби: до позитивно зарядженого електроскопа підносять позитивно заряджену паличку і спостерігають більше розходження листочків; при наближенні до того ж електроскопа негативно зарядженої палички — зближення листочків.

6. Закон Кулона для взаємодії наелектризованих тіл. Французький фізик Кулон в 1785 р. вивів експериментально закон взаємодії наелектризованих тіл: *два наелектризовані тіла діють одне на одне з силою, прямо пропорційною добуткові зарядів цих тіл і обернено пропорційною квадратів віддалі між ними*<sup>1</sup>.

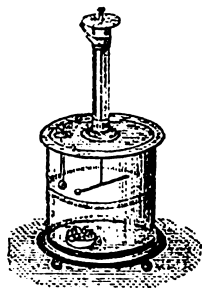


Рис. 6. Крутильна вага Кулона.

Приладом для дослідів Кулона служила крутильна вага, зображена на рисунку 6. В цьому приладі на тонкій дротинці підвищено горизонтально стрижень з ізолятора, на одному кінці якого міститься провідна кулька. Друга така ж провідна кулька укріплена на ізоляційному стрижні, пропущеному через кришку ваги. Перед електризацією кульки встановлюються на деякій віддалі одна від одної. Потім електризують кульку на стрижні, що проходить через кришку, і приводять в стикання з нею підвищену кульку. Тоді заряд першої кульки розподіляється між обома рівними кульками порівну, і рухома кулька, зарядившись однойменним зарядом, відштовхується; щоб привести її до попереднього положення, необхідно закрутити дротинку у протилежну сторону на якийсь кут. По куту кручення штики можна вирахувати силу взаємодії кульок. Вміщуючи перед електризацією кульки на різні віддалі і даючи їм один і той же заряд, можна знайти залежність сили взаємодії від віддалі. Вміщуючи кульки перед електризацією на одну й ту ж віддаль, але міняючи заряди їх (через дотик з іншими рівними кульками), можна знайти залежність сили взаємодії від величини заряду.

Сила взаємодії зарядів направлена по прямій, що сполучає ці заряди.

Закон Кулона можна виразити формулою так. Позначимо через  $k$  силу взаємодії двох зарядів, прийнятих за одиницю і уміщених на віддалі одиниці довжини в пустоті. Тоді сила взаємодії заряду в  $q$  одиниць і заряду в  $q_1$  одиниць на віддалі одиниць

<sup>1</sup> Закон має місце для зарядів, що містяться на тілах надзвичайно малого розміру порівняно з віддаллю між тілами, для так званих точкових зарядів.



довжини, пропорційнальна за законом Кулона величині зарядів, виразиться через  $kqq_1$ .

Якщо ті самі заряди вмістити на віддалі  $r$  одиниць довжини, то сила їх взаємодії  $F$ , обернено пропорційна квадратові їх віддалі, виразиться так:

$$F = \frac{kqq_1}{r^2} \quad (1a)$$

Якщо ж заряди будуть розміщені всередині якогонебудь ізолятора (що називається також діелектриком), наприклад, в гасі або в маслі, то сила взаємодії зарядів в ізоляторі буде менша, ніж у пустоті, і виразиться формулою:

$$F = \frac{kqq_1}{\epsilon r^2} \quad (1б)$$

Величина  $\epsilon^1$  для кожного діелектрика має особливе значення (§ 21) і називається діелектричною сталою речовини, або діелектричною проникністю. Так, для всіх газів і повітря вона близька до одиниці; для парафіну, гасу, ебоніту — від 2 до 3,5; для сургучу — близько 4; для скла — від 5 до 10; для слюди — від 4,7 до 8; для води — дорівнює 80.

Якщо обидва заряди  $q$  і  $q_1$  мають однакові знаки, то сила  $F$  позитивна, заряди відштовхуються. Якщо ж  $q$  і  $q_1$  мають різні знаки, — сила негативна, заряди притягуються.

Через те що при терті на обох нагнаних тілах одночасно виникають в рівних кількостях різнойменні заряди, які притягуються, то на відокремлення одного від одного цих тіл треба затратити роботу. Поки така робота не виконана, обидва заряди знаходяться на стичних тілах майже в одних і тих же точках простору і взаємно зрівноважуються в своїх зовнішніх проявах. Коли ж тіла роз'єднано, робота, затрачена на їх відокремлення, перетворилась у потенціальну енергію одного тіла відносно другого, так само як перетворюється в потенціальну енергію робота по підняттю тіла вгору від землі.

**7. Електростатична одиниця кількості електрики в системі CGS.** Щоб установити одиницю кількості електрики в системі CGS, треба решті величин, що входять у формулу (1a), — силі і віддалі, — надати значення одиниць цієї системи.

Якщо ми візьмемо  $r = 1$  см,  $F = 1$  дині і припустимо, що  $k = 1$  і  $q_1 = q$ , то матимемо:

$$1 \text{ дина} = \frac{1q^2}{1^2 \text{ см}^2}, \text{ звідки } q = 1 \sqrt{\text{дин} \times \text{см}^2}.$$

Отже, за електростатичну одиницю кількості електрики береться така кількість, яка діє в пустоті на рівню її кількості електрики на віддалі 1 см з силою, рівною 1 дині.

<sup>1</sup>  $\epsilon$  — грецька буква, називається епсілон.

Електростатична одиниця кількості електрики в системі CGS скорочено позначається: CGSE заряду.

Найменування одиниці заряду CGSE ми одержимо, вводячи в вираз для  $q$  найменування дини.

$$\text{Одиниця заряду CGSE} = \sqrt{\frac{2 \text{ см}}{\text{сек}^2} \cdot \text{см}^2} = 2^{\frac{1}{2}} \text{ см}^{\frac{3}{2}} \text{ сек}^{-1}.$$

Відома з початкового курсу практична одиниця кількості електрики — кулон<sup>1</sup> — дорівнює  $3 \cdot 10^9$  од. заряду CGSE.

При такому виборі одиниць, коли  $k$  береться рівним одиниці, тобто чисельно дорівнює силі, з якою взаємодіють два одиничних заряди на віддалі одиниці довжини, формула закону Кулона набуває простішого вигляду, а саме:

$$F = \frac{q \cdot q_1}{r^2} \quad (\text{Iv})$$

### Вправа 1.

1. Точкові електричні заряди в  $+10$  і  $+12$  CGSE знаходяться на віддалі 8 см у пустоті. Обчислити і нарисувати у взятому масштабі силу їх взаємодії. Відп.  $+1,875$  дини.

2. Знайти силу взаємодії двох точкових зарядів в  $+20$  і  $-30$  CGSE, що знаходяться в гасі на віддалі 10 см. (Вважати  $\epsilon = 2$ .) Відп.  $-3$  дини.

3. На якій віддалі сила взаємодії двох зарядів по 1 CGSE дорівнює в пустоті 1Н? Відп.  $\approx 0,03$  см.

4. Яка була б сила взаємодії двох зарядів по 1 кулону на віддалі 1 м у пустоті? Відп.  $9 \cdot 10^{11}$  дин.

5. Чому повинні дорівнювати однакові заряди, щоб сила їх взаємодії в пустоті на віддалі 10 см дорівнювала 4 динам? Відп. 20 CGSE.

6. Вказати схожість і відмінну між законами Кулона і Ньютона (всесвітнього тяжіння).

8. Електронна теорія і пояснення електризації при терті. За сучасною електронною теорією атом кожного хімічного елемента складається з ядра, що несе позитивний заряд, і заряджених негативно частинок, що обертаються навколо ядра і називаються електронами. Заряд електрона дорівнює  $4,8 \cdot 10^{-10}$  CGSE. Маса електрона майже у 1840 раз менша маси атома водню.

Найпростіший з атомів — атом водню — має один електрон, що обертається навколо ядра. Позитивний заряд ядра атома водню абсолютною величиною дорівнює зарядові одного електрона. *Позитивно заряджене ядро атома водню дістало назву протона.*

Атоми інших елементів складаються з позитивно зарядженого ядра, до складу якого входять протони, і електронів, що обертаються навколо нього. Позитивний заряд ядра дорівнює абсолютною величиною сумі негативних зарядів електронів, що обертаються навколо ядра (рис. 7). Число протонів усередині ядра дорівнює числу електронів в атомі. В цілому атом будь-якої хімічної речовини — нейтральний. Боте і Беккер в 1930 році відкрили нові частинки, що, як виявилось, мають масу, рівну масі протона, але не мають заряду (нейтральні частинки); їх на-

<sup>1</sup> На честь фізика Кулона.

звали нейтронами. За сучасною теорією атомні ядра побудовані з протонів і нейтронів.

Атоми багатьох елементів, в тому числі всіх металів, легко втрачають один або кілька електронів, що обертаються навколо ядра. Тому в кожному металі є завжди так звані вільні електрони, що рухаються між атомами, — то поступаючи в сферу притягання ядра, то виходячи з неї. Ці вільні електрони і зумовлюють хорошу провідність металів.

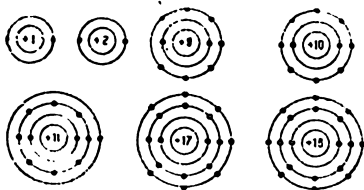


Рис. 7. Схема будови атомів елементів: водню, гелію, фтору, неону, натрію, хлору, аргону.

За електронною теорією при терті двох тіл одного об'єднаного втрачає свої електрони, віддаючи їх другому. Те тіло, на якому виявляється недостача електронів, буває заряджене позитивно; те ж тіло, на якому утворюється надмір електронів, стає зарядженим негативно. Через те що між електронами і позитивно зарядженими ядрами існує притягання, то для відокремлення їх треба виконати роботу.

9. Розподіл електрики на неспровіднику і ізольованому провіднику. В § 4 було вже відзначено, що на неспровіднику електрика залишається на тих місцях, де вона виникає від тертя або стикання; на провіднику ж вона поширюється по всьому тілу. Дальші дослідження показують, що *електричні заряди в стані спокою розподіляються тільки по зовнішній поверхні провідника*. З численних спроб, що виявляють це явище, можна

спізнитися на одній. Якщо поставити циліндр з металічної сітки на ізоляційну підставку (рис. 8) і сполучити внутрішню поверхню сітки з одним електроскопом, а зовнішню — з другим, то при електризації сітки через дотик з натертою скляною або ебонітовою паличкою внутрішній електроскоп не виявляє ніякого заряду, тоді як листочки зовнішнього розходяться все більше й більше в міру електризації. Через те що однойменні заряди, завантажені провіднику, взаємно відштовхуються і можуть переміщатися по провіднику, то вони намагаються відійти один від одного на якнайбільшу віддаль, поки неспровідник, наприклад повітря, що оточує провідник, не затримає їх руху, а це і значить, що заряди розміщуються на зовнішній поверхні провідника.

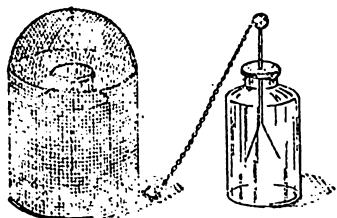


Рис. 8. Електричний заряд розподіляється по зовнішній поверхні провідника.

спізнитися на одній. Якщо поставити циліндр з металічної сітки на ізоляційну підставку (рис. 8) і сполучити внутрішню поверхню сітки з одним електроскопом, а зовнішню — з другим, то при електризації сітки через дотик з натертою скляною або ебонітовою паличкою внутрішній електроскоп не виявляє ніякого заряду, тоді як листочки зовнішнього розходяться все більше й більше в міру електризації. Через те що однойменні заряди, завантажені провіднику, взаємно відштовхуються і можуть переміщатися по провіднику, то вони намагаються відійти один від одного на якнайбільшу віддаль, поки неспровідник, наприклад повітря, що оточує провідник, не затримає їх руху, а це і значить, що заряди розміщуються на зовнішній поверхні провідника.

10. Електрична густина. Залежно від способу електризації, різні частини об'єму неспровідника можуть містити різні кіль-

кості електрики. Для характеристики розподілу електрики в не-  
провіднику вводиться поняття — об'ємна густина елек-  
трики. *Об'ємна густина електрики вимірюється кіль-  
кістю електрики, що припадає на  $1 \text{ см}^3$  тіла.*

Через те що на провіднику заряд розподіляється в стані рів-  
новаги тільки на зовнішній поверхні його, то для характеристики  
його розподілу вводиться поняття поверхневої густини  
електрики. *Поверхнева густина електрики вимірюється кіль-  
кістю електрики, що припадає на  $1 \text{ см}^2$  поверхні провідника.*  
Поверхнева густина залежить від кривини поверхні. На кулі, де  
кривина в усіх точках однакова, густина всюди  
однакова.

На поверхнях різної кривини *поверхнева гу-  
стина зростає із збільшенням кривини.*

Переконалися в такому розподілі густини  
можна на такому досліді. Треба зробити про-  
відник у формі циліндра і конуса, складених  
основами (рис. 9), укріпити його на ізоляційній  
підставці і підвісити в різних точках твірних  
циліндра і конуса листочки.

При електризації провідника листочки на  
твірній циліндра, який має по всій поверхні  
однакову кривину, розходяться на один і той же кут; листочки  
на твірній конуса розходяться на все більший кут в міру на-  
ближення до вершини<sup>1</sup>; але її кривина конуса збільшується від  
основи до вершини<sup>1</sup>. Різне розходження листочків указує на не-  
рівномірний розподіл заряду по поверхні даного провідника.

На провідниках з дуже великою кривиною, на так званих  
вістргах, електрика не може держатися, коли її густина пере-  
вищує певні для даних умов межі. Тоді заряджений провідник  
починає втрачати свій заряд. Втрата негативного заряду почи-  
нається при меншій густині, ніж позитивного. Причина цієї втрати  
заряду розглядається в § 103.

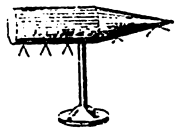


Рис. 9. Поверхнева  
густина зростає із  
збільшенням кри-  
вини поверхні.

## Вправа 2.

1. Чому провідники для електричних спроб робляться порожнистими?

2. Якщо доторкнутися зарядженим провідником до зовнішньої поверхні ін-  
шого незарядженого ізоляційного провідника, то чи може перший провідник  
передати другому весь свій заряд?

3. До якої поверхні порожнистого ізоляційного провідника треба доторк-  
нутися зарядженим провідником, щоб він передав першому весь свій заряд  
повністю?

4. Як за допомогою негативно зарядженої палички взяти невідомий знак  
заряду електроскопа?

5. Чому прилади в електростатичних спробах, призначені для зберігання  
на собі електрики, не мають гострих кінців, а закінчуються округленими по-  
верхнями?

6. Циліндрична скляна паличка завдовжки 20 см і діаметром в 2 см має  
рівномірно розподілений заряд в 100 од. CGSE. Знайти об'ємну густина елек-  
трики.

7. Металічна куля радіусом в 4 см має заряд в 60 од. CGSE. Знайти по-  
верхневу густина електрики.

<sup>1</sup> У цьому напрямку зменшуються радіуси кіл, що являють собою перерізи,  
паралельні основи.

11. Електричне поле. Напруженість. Силкові лінії. Заряджене тіло уже на віддалі діє на електроскоп, розсуваючи його листочки.

Простір, в якому виявляється дія зарядженого тіла на інші тіла, називається електричним полем зарядженого тіла.

Дія електричного поля на різні тіла залежить як від заряду, що утворює поле, так і від зарядів тіл, що вносяться в поле.

Щоб мати змогу порівнювати між собою різні поля, умовились відносити їх дії до одного й того ж заряду, а саме до одиниці позитивного заряду. Тоді поле можна характеризувати особливою величиною, що називається напруженістю поля.

Напруженість поля в даній точці є величина, вимірювана силою, з якою поле діє на одиницю позитивного заряду, вміщеного в дану точку поля.

Якщо  $F$  — сила, з якою заряд, що утворює поле, діє на заряд  $q_1$ , то сила, з якою поле діє на одиницю заряду, буде  $\frac{F}{q_1}$ .

Якщо позначити напруженість поля через  $E$ , то:

$$E = \frac{F}{q_1}; \quad (IIa)$$

з формули (Iв) маємо:

для поля точкового заряду:

$$E = \frac{q}{r^2}; \quad (IIб)$$

для пустоти:

$$E = \frac{q}{r^2}. \quad (IIв)$$

Найменування для одиниці напруженості в системі CGSE:

$$E = \frac{\text{дина}}{\text{CGSE зар.}} = \frac{2 \cdot \text{с.м}}{\frac{1}{\text{сек}^2} \frac{1}{2} \text{с.м}^2 \text{сек}^{-1}} = \frac{2^{\frac{1}{2}}}{\frac{1}{\text{с.м}^2 \text{сек}}} = 2^{\frac{1}{2}} \text{с.м}^{-\frac{1}{2}} \text{сек}^{-1}.$$

Напруженість поля, як і сила, є вектор.

Вивчити поле даного зарядженого тіла — значить узяти величину і напрям напруженості в різних точках поля. Напрямок напруженості в різних точках поля можна зобразити лініями, які називаються силковими лініями. Одержати картину силкових ліній можна з допомогою кристаликів хініну або кусочків азбесту, змучених у в'язкому діелектрику, наприклад, у вазеліновому маслі або в ридині. Якщо в цьому діелектрику утворити електричне поле, то кристалики у кожній точці розміщуються в напрямі сили, що діє в цій точці.

Для цієї ж мети можна скористуватися довгими гнучкими провідниками, наприклад тонкими стрічками легкого цигаркового паперу.

Якщо приклеїти такі довгі тонкі стрічки до маленької металічної кульки, укріпленої на непровідній підставці, і зарядити

Пі позитивною електрикою, то всі паперові стрічки, що зарядилися від кульки теж позитивно, відштовхуються від неї прямолінійно по радіусах; як показує рисунок 10.

В даному випадку сили, що діють на позитивний заряд, направлені по радіусах від кульки. Значить, силові лінії поля, утвореного точковим позитивним зарядом, є радіальні прямі, що розходяться з даної точки, як з центра.

Силовим лініям приписують певний напрям. За напрям силових ліній береться той напрям, по якому рухалося б у даному полі позитивно заряджене тіло з зникаюче малою масою. В розглянутому випадку силові лінії будуть направлені від кульки, що й показано на рисунку стрілками.

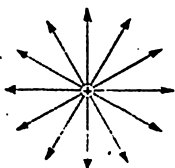


Рис. 10. Силові лінії поля, утвореного точковим позитивним зарядом.

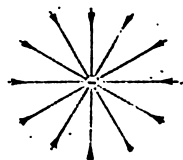


Рис. 11. Силові лінії поля, утвореного точковим негативним зарядом.

Якщо кульку зарядити негативною електрикою, то всі стрічки, як і раніше, виявляються по радіусах (рис. 11). Форма силових ліній у випадку поля, утвореного точковим зарядом будьякого знака, однакова, а саме — радіальні прямі. Тільки у випадку негативного заряду напрям силових ліній буде обернений до кульки: позитивний заряд притягувався б до негативного заряду, що утворює поле.

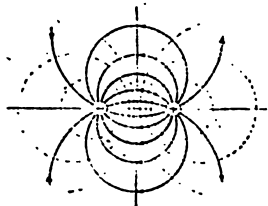


Рис. 12. Силові лінії поля, утвореного двома точковими різноіменними зарядами.

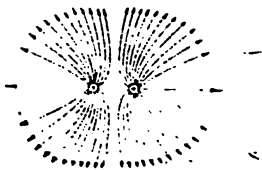


Рис. 13. Силові лінії поля, утвореного двома точковими одноіменними зарядами.

Якщо дві такі кульки, що мають паперові стрічки, зарядити різноіменними зарядами і наблизити одну до одної, то паперові стрічки розміщуються так, як показано на рисунку 12. Якщо ж обидві кульки дістануть заряди однойменні, то паперові стрічки розмістяться, як показано на рисунку 13.

Отже, рисунки 12 і 13 дають форму і напрям силових ліній полів, утворених двома точковими зарядами: в першому випадку різноіменними, в другому — однойменними.

Два останні рисунки показують, що силові лінії — криволінійні; сили ж на рисунку зображаються відрізками прямої. Пряма

і крива тоді мають спільний напрям, коли пряма дотична до кривої. Отже, *силовою лінією електричного поля називається така лінія, дотична до якої в кожній точці дає напрям напруженості поля в цій точці. Зи напрям силової лінії береться той напрям, по якому поле діє на позитивний заряд. Отже, силова лінія сходить від позитивно зарядженого тіла і закінчується на негативно зарядженому тілі.*

У тому полі, де напруженість поля в усіх точках однакова величиною і напрямом, як наприклад у проміжку між двома дуже великими паралельними, різнойменно зарядженими пластинками (рис. 14 на стор. 18), силові лінії йдуть у вигляді паралельних рівновіддалених прямих. Таке поле називається *однорідним*.

**12. Потенціал.**—Всякий нерухомий позитивний заряд виштовхуватиме з свого поля інший позитивний заряд, при чому електрична сила їх взаємодії виконуватиме роботу по переміщенню заряду. З другого боку, щоб помістити в якунебудь точку цього поля позитивний заряд, треба іншою, зовнішньою щодо поля силою виконати роботу по перемаганню відштовхної сили. Тоді робота, виконана цією зовнішньою силою над позитивно зарядженим тілом, вміщеним у якунебудь точку розгляданого поля, утворить запас потенціальної енергії цього зарядженого тіла: залишене на самого себе тіло почне рухатися, виходити з поля, і його потенціальна енергія перетворюватиметься в кінетичну енергію. Потенціальна енергія зарядженого тіла в електричному полі називається *електростатичною енергією*.

В різних точках поля, на різних віддальх від заряду, що утворює поле, вміщувані в них заряди матимуть різні запаси потенціальної енергії. Звідси видно, що для кожної точки поля можна розрахувати, який запас потенціальної енергії мав би внесений в неї заряд  $+1$ , незалежно від того, чи знаходитиметься там у дійсності заряд чи ні.

Потенціальна енергія заряду  $+1$ , вимірювана роботою, необхідною для перенесення цього заряду з безконечності в дану точку поля, може служити характеристикою поля в цій точці і дістала спеціальну назву — *потенціал*.

Наведені міркування нагадують розрахунки запасу потенціальної енергії в тілах, піднятих на різну висоту над поверхнею землі. І в цьому випадку доводиться якоюнебудь силою перемагати силу притягання тіла до землі. Робота, виконана цією підіймальною силою, перетворюється в запас потенціальної енергії піднятого тіла. Тіло, залишене на самого себе, падає під дією сили: запас його потенціальної енергії перетворюється в кінетичну енергію. Напряом, по якому діє сила тяжіння, збігається з земним радіусом. Ми можемо і для земного притягання ввести такі ж позначення, як і для сили електричної взаємодії. Ми можемо говорити про поле тяжіння; напрям сил у цьому полі можемо позначити силовими лініями, які матимуть форму радіальних прямих. Для кожної точки поля тяжіння так само можна розрахувати запас потенціальної енергії для  $1$  г маси, який характеризує цю точку, або так званий потенціал

земного тяжіння. Він дорівнює  $gh$ , де  $h$  дорівнює висоті підняття.

Отже, потенціал в кожній точці електричного поля вимірюється роботою, виконаною при переміщенні одиниці додатної електрики з безконечності в дану точку поля. Виконана для переміщення дії поля робота перетворюється в потенціальну енергію заряду<sup>1</sup>, через що величини, вимірювані роботою при переміщенні одиниці додатної електрики, і дається назва потенціала. Потенціал позначається буквою  $U$ .

*Робота по переміщенню одиниці додатної електрики на якомунебудь відрізку силової лінії чисельно дорівнює різниці потенціалів у точках початку й кінця шляху по силовій лінії. Робота по переміщенню кількості електрики  $q$  дорівнює добутковій кількості електрики на різницю потенціалів точок початку й кінця шляху:*

$$A = q(U_A - U_B). \quad (III)$$

Сила поля завжди переміщає позитивний заряд від точки з більшим потенціалом у точку з меншим потенціалом (в напрямку зменшення запасу потенціальної енергії).

Через те що в обчислення роботи між двома точками поля входить тільки різниця потенціалів цих точок, то ця різниця потенціалів дістає особливу назву — напруга між двома точками поля.

Теорія дає залежність між потенціалом  $U$  в точці поля, зарядом  $q$ , що утворює поле, і віддаллю  $r$  точки, для якої визначається потенціал, від заряду, що утворює поле. Ця залежність виражається формулою:

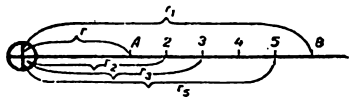


Рис. 13а. До виводу формули потенціала в точці поля.

рядом  $+q$  (рис 13а) Щоб перемістити в цьому полі заряд  $+q_1$  з точки  $B$  в точку  $A$ , зовнішня сила повинна виконати деяку роботу проти сили електрич-

<sup>1</sup> Потенціальна енергія завжди належить сукупності тіл: піднятий над землею камінь дістає якусь кількість потенціальної енергії щодо землі; відштовхуваний заряд має потенціальну енергію щодо заряду, який утворює поле, до якого його наближено.

<sup>2</sup> Фарадей Михайл — геніальний фізик першої половини XIX століття, виятково видатний експериментатор — народився в околиці Лондона.

Фарадей прийшов до висновку, що наелектризовані або намагнічені тіла взаємодіють не на віддалі, а тільки через середовище, що оточує тіла. Висло-



Фарадей<sup>2</sup> (1791 -- 1867).

$$U = \frac{q}{r}.$$

Вивести цю формулу можна так (при деяких спрощеннях).

Розглянемо роботу при переміщенні заряду в полі, утвореному точковим зарядом  $+q$  з точки  $B$  в точку  $A$ , зовнішня сила повинна виконати деяку роботу проти сили електрич-



ної взаємодії зарядів. Таку ж величину роботу виконає і електрична сила, виштовхуючи заряд  $+q_1$  з точки  $A$  в точку  $B$ . Для обчислення цієї роботи не можна користуватися вираженням роботи через добуток сили на шлях бо електричні сили у точці  $A$  на віддалі  $r$  і в точці  $B$  на віддалі  $r_1$  від заряду  $q$  різні. Але основною формулою роботи все ж можна скористуватися, якщо розбити всю віддаль  $AB$  на велику кількість таких малих ділянок:  $A-2$ ;  $2-3$ ;  $3-4$  і т. д. в межах яких силу можна вважати сталою. За таку сталу силу в межах ділянки можна прийняти середню геометричну із сил, що діють в кінцевих точках ділянки. Так, якщо в точці  $A$  сила  $f_A = \frac{qq_1}{r^2}$ , а в точці  $2$  сила

$$f_2 = \frac{qq_1}{r_2^2}, \text{ то за сталу силу на ділянці } A-2 \text{ можна взяти силу:}$$

$$f = \sqrt{f_A f_2} = \sqrt{\frac{qq_1}{r^2} \cdot \frac{qq_1}{r_2^2}}$$

На дальшій ділянці  $2-3$  сила зміниться стрибком і матиме значення  $\frac{qq_1}{r_2 r_3}$  і т. д. При такому розрахунку похибка від заміни неперервно змінної сили сталою сталою в межах ділянки буде тим менша, чим менші самі ділянки.

Довжина ділянки  $A-2$  виражиться різницею віддалей її кінців від заряду, що утворює поле, тобто через  $r_2 - r$ ; довжина ділянки  $2-3$  через  $r_3 - r_2$  і т. д. Тоді робота на кожній ділянці, обчислювана за формулою  $A = Fs$ , виразиться так:

$$A_1 = \frac{qq_1}{rr_2} (r_2 - r) = \frac{qq_1}{r} \cdot \frac{qq_1}{r_2} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r_2} \right);$$

$$A_2 = \frac{qq_1}{r_2 r_3} (r_3 - r_2) = qq_1 \left( \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} \right);$$

$$A_3 = \frac{qq_1}{r_3 r_4} (r_4 - r_3) = qq_1 \left( \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right).$$

Вся робота на ділянці  $AB$  дорівнюватиме сумі робіт на окремих частинах  $\Pi$ :

$$A = qq_1 \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} + \dots - \frac{1}{r_1} \right),$$

або

$$A = qq_1 \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} \right).$$

Якщо обчислити роботу при переміщенні *одиниці позитивної електрики* ( $q_1 = 1$ ) на тому ж шляху  $AB$ ; і цю роботу позначити буквою  $U$ , то матимемо:

$$U = \frac{A}{q_1}, \text{ або } U = \frac{q}{r} - \frac{q}{r_1}.$$

Якщо заряд  $+1$  все далі виштовхуватиметься з поля, то віддаль  $r_1$  збільшуватиметься, дріб  $\frac{1}{r_1}$  зменшуватиметься і, кінець-кінцем, він перетвориться в нуль, коли заряд  $+1$  переміститься на безконечно велику віддаль. Тоді вели-

чиним думки лягли в основу вчення про електричне й магнітне поля, яке привело до сучасного вчення про електромагнітні коливання, зокрема про радіохвилі.

Фарадей відкрив електромагнітну індукцію — основу сучасної електротехніки. Він показав, що здатність намагнічуватися мають усі без винятку тіла в твердому, рідкому і газоподібному стані; він установив діяння магнітного поля на світловий промінь, відкрив закони хімічної дії струму і дав спосіб перетворення газів у рідкий стан. В своїх працях Фарадей жерувався глибоким переконанням у єдності всіх сил природи. Під кінець свого життя Фарадей був дійсним і почесним членом майже 70 наукових закладів.

чина  $\frac{q}{r}$  представить чисельно роботу по переміщенню заряду  $+1$  діянням поля з точки  $A$  в безконечність;  $\frac{q}{r}$  щодо абсолютної величини є робота, виконана зовнішньою силою проти діяння поля при переміщенні  $+1$  кількості електрики з безконечності в дану точку поля. Ця величина і називається потенціалом у даній точці поля. Отже,  $\frac{q}{r}$  є потенціал у точці  $A$ , або  $U_A$ , так само  $\frac{q}{r_2}$  є потенціал у точці  $B$ , або  $U_B$ ; звідси:

$$U_A = \frac{q}{r}; \quad U_B = \frac{q}{r_2}; \quad U = U_A - U_B.$$

13. Одиниці потенціала. Одянницю потенціала можна вивести з формули:

$$A = q(U_A - U_B),$$

звідки:

$$U_A - U_B = \frac{A}{q}.$$

Якщо припустити, що  $A = 1$  ерг у  $q = 1$  заряду CGSE, то

$$U_A - U_B = \frac{1 \text{ ерг}}{1 \text{ заряд CGSE}} = 1 \frac{\text{ерг}}{\text{од. зар. CGSE}}.$$

За електростатичну одиницю потенціала в системі CGSE береться така різниця потенціалів двох точок, яка при переміщенні одиниці кількості електрики з однієї точки в іншу дає роботу в 1 ерг. Найменування одиниці потенціала в системі CGSE:

$$1 \frac{\text{ерг}}{\text{од. зар. CGSE}} = 1 \cdot \frac{z \text{ см}^2 \text{ сек}^{-2}}{z^2 \text{ см}^2 \text{ сек}^{-1}} = z^{\frac{1}{2}} \text{ см}^{\frac{1}{2}} \text{ сек}^{-1}.$$

За практичну одиницю напруги або різниці потенціалів береться вольт.

Вольт становить  $\frac{1}{300}$  одиниці потенціала в системі CGSE<sup>1</sup>.

Розрахуємо роботу переміщення заряду в 1 кулон між двома точками поля, напруга між якими дорівнює 1 вольту.

За формулою (III) маємо:

$$\begin{aligned} A &= 1 \text{ кулон} \cdot 1 \text{ вольт} = 3 \cdot 10^9 z^{\frac{1}{2}} \text{ см}^{\frac{3}{2}} \text{ сек}^{-1} \times \\ &\times \frac{1}{300} z^{\frac{1}{2}} \text{ см}^{\frac{1}{2}} \text{ сек}^{-1} = 10^7 z \text{ см}^2 \text{ сек}^{-2} = 10^7 \text{ ерг} = 1 \text{ джоуль}. \end{aligned}$$

Отже, вольт можна визначити, як таку напругу, при якій переміщення заряду в 1 кулон вимагає роботи в 1 джоуль.

<sup>1</sup> Не треба плутати дві різні величини — напруженість і напругу, що мають схожі найменування: перша вимірюється силою поля, яка діє на заряд  $+1$ , друга — роботою, яку виконує сила поля при переміщенні заряду  $+1$ .

### Вправа 3.

1. Чому дорівнює напруженість поля, утвореного зарядом в  $+1600 \text{ CGSE}$  на віддалі  $20 \text{ см}$  від нього в пустоті?

2. Поле утворено зарядом в  $+1$  кулон. Знайти напруженість поля на віддалі  $2 \text{ м}$  від заряду.

14. Поверхні рівного потенціала в полі, утвореному точковим зарядом. Якщо електричне поле утворене одним точковим зарядом, то в усіх точках його, рівновіддалених від заряду, що утворює поле, потенціали будуть рівні.

Такі рівновіддалені точки лежать на концентричних сферичних поверхнях, розміщених навколо точкового заряду. Отже, в полі, утвореному одним зарядом, сферичні поверхні, описані навколо цього заряду, є поверхні рівного потенціала, або еквіпотенціальні поверхні. В кожній точці поля діюча сила утворює прямий кут з поверхнею рівного потенціала, бо сила направлена по радіусу, або, як кажуть у геометрії, сила нормальна до поверхні.

15. Робота переміщення заряду між еквіпотенціальними поверхнями. Ми бачили, що робота, виконувана силою поля при переміщенні заряду уздовж силової лінії, залежить від різниці потенціалів у точках початку і кінця шляху. Тій же величині дорівнює робота, виконувана при русі заряду проти сили поля.

Чи зміниться робота, якщо перемістити заряд  $+1$  не по силевій лінії, а по будь-якому шляху між тими ж кінцевими точками? Щоб відповісти на це запитання, проведемо дві еквіпотенціальні поверхні (рис. 14) настільки близько, щоб малі частини їх можна було вважати частинами паралельних площин і поле між ними було однорідне. Лінія  $AB$  дає напрям сили поля. Довжину цієї лінії позначимо через  $L_0$ . Сила поля, направлена вздовж  $AB$ , нехай буде  $F$ . Якщо заряд  $+1$  переміщався по лінії  $AC = L$  під кутом  $\alpha$  до лінії  $AB$ , то робота сили  $F$  виразилася б формулою:

$$A_{AC} = FL \cos \alpha, \text{ але } L \cos \alpha = L_0, \text{ звідки: } A_{AC} = FL_0.$$

Робота на шляху  $CB$  вздовж еквіпотенціальної поверхні  $A_{CB} = 0$ , через те що сила перпендикулярна до еквіпотенціальної поверхні, і в цьому випадку  $\alpha = 90^\circ$ ;  $\cos 90^\circ = 0$ . Але  $FL_0$  є в той же час робота вздовж силової лінії  $AB$ .

Отже, вся робота по переміщенню заряду з точки  $A$  в безкінечно близьку точку  $B$  по лінії  $ACB$  дорівнює роботі при русі по силевій лінії між цими ж точками.

Якщо шлях переміщення заряду між двома будь-якими еквіпотенціальними поверхнями буде ламана або крива лінія, то весь простір між крайніми еквіпотенціальними поверхнями можна розбити безкінечно близькими еквіпотенціальними поверхнями на такі малі проміжки, що в межах кожного проміжку частину кривої можна прийняти за пряму. Застосовуючи до кожної ділянки ламаної лінії попередній висновок, можна прийти до такого остаточного висновку:

**Робота сили поля або робота супроти сили поля при переміщенні заряду між двома точками поля не залежить від форми шляху між ними, а тільки від різниці потенціалів точок початку й кінця шляху.**

Таке ж саме співвідношення має місце і при обчисленні роботи сили тяжіння при переміщенні тіла в полі сили тяжіння<sup>1</sup>.

16. Еквіпотенціальні поверхні в полі будь-яких зарядів. Легко зрозуміти, що еквіпотенціальні поверхні в першому - ліпшому полі, утвореному якими

<sup>1</sup> Порівняйте роботу по похилій площині без тертя і роботу по підняттю тягара вертикально на ту ж висоту (1-ша частина «Курсу фізики»).

завгодно зарядами, повинні мати нормальними<sup>1</sup> вектори сил поля, які діють в точках цих поверхонь, або, інакше кажучи, сили повинні бути нормальними до поверхонь. Справді, робота переміщення заряду між двома точками вздовж екіпотенціальної поверхні, рівна різниці потенціалів у цих точках, буде рівна нулеві.

Робота ж може бути рівна нулеві, якщо сила перпендикулярна до переміщення. Робота, обчислювана для кожного, як завгодно малого, переміщення за формулою  $A = F L \cos \alpha$  (де  $\alpha$  — кут між напрямками сили і переміщення), може бути нулем, при відміненні від нуля  $F$  та  $L$ , тільки тоді, коли  $\cos \alpha = 0$ ; остання ж умова настає при  $\alpha = 90^\circ$ . Отже, *електрична сила нормальна до екіпотенціальної поверхні*.

Таким чином, якщо відомий напрям силових ліній у полі, утвореному будь-якими зарядами, то можна провести нормально до них поверхні, які будуть поверхнями рівного потенціала. Такі екіпотенціальні поверхні в полі, утвореному двома різномісними точковими зарядами, зображені пунктирними лініями на рисунку 12.

Коли заряджено ізолюваний провідник, то заряди на ньому знаходяться в рівновазі. Це значить, що сили взаємодії одних частин зарядів з іншими перпендикулярні до поверхні провідника. Інакше при легкій рухомості зарядів по провіднику вони рухалися б по його поверхні. Якщо ж сили в кожній точці перпендикулярні до поверхні провідника, то це значить, що *поверхня провідника є однією з екіпотенціальних поверхонь*.

**17. Електрометр:** Провідники можуть бути наелектризовані до різних потенціалів. Судити про потенціал провідника можна з розходження листочків електроскопа, сполученого довгим дротом з провідником<sup>2</sup>. При сполученні з провідником електроскоп

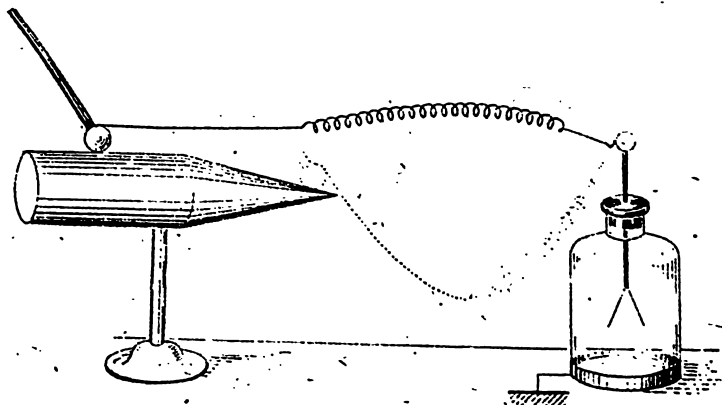


Рис. 15. Потенціал провідника однаковий на всьому провіднику.

буде частиною поверхні провідника. На нього переїде частина заряду провідника, листочки електроскопа розійдуться, і потенціал електроскопа стане однаковий з потенціалом провідника. Що електроскоп, сполучений з зарядженим провідником, показує його потенціал, можна переконатися з такої спроби. Заряджають

<sup>1</sup> Нормаль — перпендикуляр до поверхні.

<sup>2</sup> Оболонка електроскопа сполучена з землею.

провідник у формі циліндра з конусом. До кульки далеко відставленого електроскопа прилучають гнучку дротинку, другий кінець якої з'єднаний з пробною кулькою (рис. 15). Пробною кулькою називається металічна кулька на ізоляційній ручці. Потім пробною кулькою проводять по основі і вздовж твірних циліндра і конуса до самої вершини останнього. При цьому переміщенні показ електроскопа не змінюється. Отже, тепер електроскоп показує не густину заряду, яка змінюється від основи до вершини, а потенціал, який є сталим на всьому провіднику.

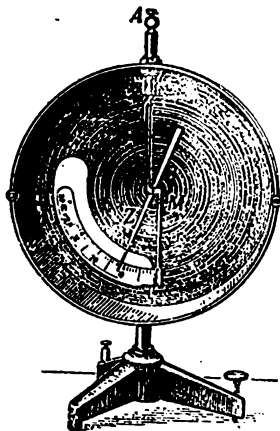


Рис. 16. Електрометр Брауна.

Якщо до електроскопа прилучити шкалу, за якою можна вимірювати кути відхилення листочка, то можна порівнювати між собою потенціали різних провідників.

Електроскоп з шкалою, призначений для вимірювання потенціалів у певних одиницях, називається електрометром (рис. 16). Поняття про градування електрометра дано в § 29.

18. Поверхня нульового потенціала. Через те що всі попередні міркування показують, що робота сили в електричному полі залежить тільки від різниці потенціалів, то абсолютна величина потенціала точки не має значення. Тому при відлічуванні потенціалів можна взяти за нуль потенціал будьякої точки. Умовилися за нульовий потенціал вважати потенціал Землі.

Так само різниця двох температур, наприклад температури танення льоду і кипіння води, не залежить від того, чи відлічуємо ми їх від абсолютного нуля чи нуля Цельсія. Вершина Казбека завжди буде на 5100 м вище рівня моря, чи будемо відлічувати висоти від рівня моря чи від дна океану на місці найбільшої глибини.

19. Перехід електрики з одного провідника на другий залежить від їх потенціалів. Якщо сполучити два провідники з однаковими потенціалами, між ними не буде переходу електрики.

Якщо ж зарядити два провідники позитивною електрикою до різних потенціалів (вимірявши їх електрометром) і потім сполучити обидва провідники дотною, то почеться переміщення електрики з одного провідника на другий; при цьому електрометр відзначить, що обидва сполучені провідники дістануть один і той же потенціал, проміжний між двома початковими потенціалами. Спроба показує, що *позитивна електрика переміщується по провіднику від тіла з більшим потенціалом до тіла з меншим потенціалом, поки потенціали тіл не зрівняються*. Така ж спроба з двома негативно зарядженими до різних потенціалів

тілам покаже, що *негативна електрика переміщається по провіднику від тіла з меншим потенціалом до тіла з більшим потенціалом*<sup>1</sup>.

Якщо позитивно заряджене тіло сполучити з землею, то весь позитивний заряд піде в землю; те саме станеться, якщо сполучити з землею негативно заряджене тіло; негативний заряд перейде в землю від провідника. Звідси видно, що позитивно заряджене тіло має позитивний потенціал, негативно заряджене тіло — негативний потенціал.

Через те що в металах вільно можуть пересуватися тільки електрони, а позитивний заряд означає недостачу електронів, то при сполученні позитивно зарядженого тіла з землею насправді електрони перейдуть з землі на провідник у такій кількості, щоб нейтралізувати його позитивний заряд. Остаточний стан провідника буде такий же, як коли б пішов у землю позитивний заряд провідника; тому при описі цих явищ продовжують додержуватися старих способів вираження, говорячи про рух позитивної електрики.

Явище переміщення електрики схоже на явище руху рідини з однієї посудини в другу, з нею сполучену, коли в першій рівень рідини вищий, ніж у другій; рух припиняється, коли рівні в обох посудинах зрівняються.

**20. Електростатична індукція.** Дослідимо діяння електричного поля на тіла, що вводяться в нього. Почнемо з діяння поля на ізолюваний провідник. Як провідник візьмемо два однакових електроскопів, кульки яких сполучені металічною дротинкою з ізоляційною ручкою (рис. 17). Електричне поле утворюватимемо з допомогою наелектризованої скляної або ебонітової палички.

Піднесемо з якоїнебудь сторони, наприклад з правої, до електроскопів позитивно заряджену паличку. Листочки обох електроскопів розходяться навіть тоді, коли заряджене тіло знаходиться ще на деякій віддалі від електроскопів.

Висновок: при наближенні зарядженого провідника до незарядженого на обох кінцях останнього появляються електричні заряди.

Приймемо (не торкаючись зарядженою паличкою до електроскопів) заряджене тіло; обидві пари листочків зовсім опадають.

Висновок: заряди, що утворилися, різні і виникли в однакових кількостях (інакше не змогла б статися повна нейтралізація).

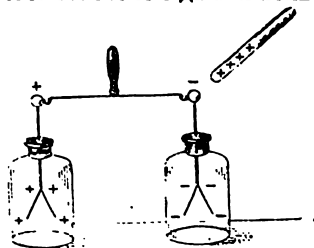


Рис. 17. Індукція двох різноимених зарядів на кінцях ізолюваного провідника в присутності зарядженого тіла.

<sup>1</sup> „Більший“ і „менший“ тут треба розуміти алгебрично; наприклад, потенціал — 5V алгебрично більший потенціала — 10V.

Щоб узнати, якого знака заряд утворився на кожному електроскопі, знову наблизимо з тієї ж сторони той же позитивний заряд і погім знімемо за ізоляційну ручку дротинку, що сполучає обидва електроскопи. Тепер електроскопи зберігають свої заряди і після віддалення зарядженого тіла. Дослідимо їх за правилом, поданим у § 5.

Виявляється, що електроскоп, до якого піднесено позитивний заряд, має заряд негативний, другий же електроскоп має заряд позитивний.

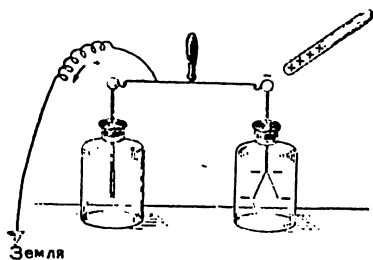


Рис. 18. Заряд, однойменний з впливаючим, іде в землю; на тілі лишається заряд різнойменний.

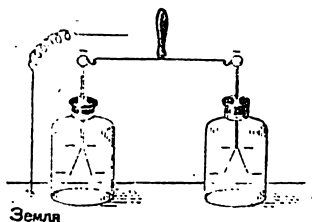


Рис. 18а. Зарядження ізолюваного провідника через індукцію.

Повторимо спроби, піднісши позитивний заряд зліва до електроскопів або підносячи спочатку справа, а потім зліва негативний заряд. Визначаючи щоразу знаки виникаючих зарядів, можемо зробити такий загальний висновок: *якщо наблизити заряджене тіло до ізолюваного провідника, то на ізолюваному провіднику виникають два різнойменних заряди в рівних кількостях; при цьому на кінці провідника, ближчому до зарядженого тіла, виникає заряд, різнойменний з впливаючим зарядом (на піднесеному тілі), на кінці віддаленому — однойменний.* Після віддалення впливаючого заряду провідник знову стає незарядженим. Це явище називається електростатичною індукцією і пояснюється так. Припустимо, що впливаюче тіло заряджене позитивно. Тоді утворене ним поле пригягає вільні негативні заряди провідника, внесеного в поле. Такими вільними, легко пересувними кількостями негативної електрики є вільні електрони.

Під впливом поля позитивно зарядженого тіла електрони ізолюваного провідника переміщуються на його кінець, ближчий до зарядженого тіла, і тут утворюють негативний індуктований заряд; недостача електронів на віддаленому кінці створює рівновеликий позитивний заряд. Після віддалення ізолюваного провідника з поля електрони знову рівномірно розподіляються по провіднику, і відновлюється нейтральний стан провідника. Якщо поле утворене негативно зарядженим тілом, то

електрони відштовхуються на дальший кінець його, де і утворюють негативний заряд. Ближчий кінець провідника втрапить частину електронів, і на ньому утвориться позитивний заряд.

Якщо в присутності впливаючого тіла сполучити на мить ізольований провідник (електроскопа) з землею (рис. 18), то однойменний з впливаючим заряд іде в землю, яка тепер стає віддаленим кінцем провідника. Різноіменний же заряд, притягаючись до зарядженого тіла, лишається на провіднику. Якщо припинити сполучення провідника з землею і потім віддалити впливаюче тіло, то ізольований провідник буде зарядженим різнойменно з впливаючим тілом (рис. 18а).

Індукція зарядів відбувається і в непровіднику. Якщо до зарядженого електроскопа піднести незаряджений непровідник, то листочки електроскопа злегка опадають (рис. 19). Це опадання можна пояснити тим, що в діелектрику (непровіднику) наводяться по індукції заряди, і різнойменний заряд ближчого кінця діелектрика притягує до себе частину заряду, який знаходиться на електроскопі, і цим спричиняє перерозподіл заряду в ньому. Але якщо в присутності зарядженого тіла поділити діелектрик пополам, то окремих різнойменних зарядів на обох його половинах виявити не вдасться (як це було виявлено в аналогічній спробі при поділі провідника).



Рис. 19 Вплив піднесеного діелектрика на розподіл заряду в електроскопі

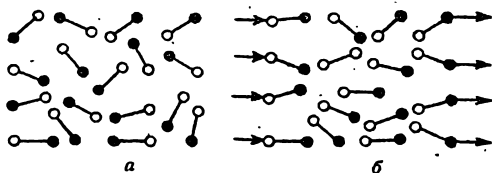


Рис. 20. Аморфний діелектрик.

а — неполяризований; б — поляризований.

Останнє явище можна пояснити так: в діелектрику всі електрони нерозривно зв'язані з позитивними ядрами, що входять до складу атомів або молекул. Тому в діелектриках позитивні і негативні заряди можуть лише дуже мало зміщуватися один відносно одного в межах кожної молекули.

Найпростішою моделлю нейтральної молекули можна вважати диполь, що складається з позитивного ядра (чорні кружки на



рис. 20) і негативного електрона (білі кружки), нерозривно зв'язаних один з одним.

При відсутності зовнішнього поля ці диполі розміщені в діелектрику безладно (рис. 20, а). При внесенні діелектрика в електричне поле молекули його повернуться на деякий кут так, що позитивна частина молекули трохи переміститься в напрямі силових ліній зовнішнього поля, негативна — в протилежну сторону (рис. 20, б). В результаті малих поворотів позитивні заряди перемістяться до одного кінця тіла, негативні — до другого.

Діелектрик, в якому сталося таке зміщення в межах кожної молекули позитивних зарядів в одну сторону і негативних — в другу, називається *поляризованим*, а саме явище — *поляризацією діелектрика*.

Звідси ясно, чому поділом діелектрика пополам відокремити в ньому позитивні заряди від негативних не вдається. Після видалення непровідника із зовнішнього поля змінене розміщення диполів у діелектрику припиняється, і вони повертаються у початковий безладний стан.

**21. Наслідки з явища індукції.** 1) *Зарядження провідника через індукцію.* Щоб зарядити провідник, зокрема електроскоп, через індукцію, треба піднести до провідника заряджене тіло, на мить сполучити провідник з землею (доторкнутися пальцем), від'єднати від землі і віддалити впливаюче заряджене тіло. Провідник зарядиться зарядом, різнойменним з впливаючим зарядом, і при тому в тим більшій кількості, чим ближче був піднесений впливаючий провідник.

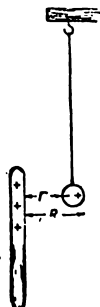


Рис. 21. Притягання різнойменних зарядів більше, ніж відштовхування однойменних.

2) *Пояснення притягання легких тіл зарядженим тілом.* При піднесенні до підвишеної на нитці кульки зарядженого тіла на найближчій стороні кульки виникає заряд, різнойменний з впливаючим, на віддаленій стороні — однойменний з ним (рис. 21). Різнойменний заряд на кульці притягається зарядом на тілі, однойменний — відштовхується. Але через те що різнойменний заряд знаходиться ближче до впливаючого, ніж однойменний, то притягання сильніше, ніж відштовхування, і кулька, як одне ціле, притягається до впливаючого тіла. При стиканні кульки з зарядженим тілом, різнойменні заряди — навідний і наведений — взаємно нейтралізуються, лишається один однойменний, в наслідок чого кулька відштовхується і виявляється наелектризованою.

3) *Взаємодія наелектризованих тіл, вміщених у діелектрику.* Якщо два різнойменно заряджених провідника вміщені в якомунебудь діелектрику, наприклад, у гасі, маслі, розтопленій сірці тощо, то діелектрик по індукції поляризується (рис. 22). Біля поверхні позитивно зарядженого тіла розміщаються негативні заряди молекулярних диполів діелектрика, коло негативно зарядженого тіла — позитивні заряди диполів.

Таке оточення кожного тіла різнойменними зарядами диполів в наслідок поляризації діелектрика повинно зменшити взаємодію заряджених тіл, в діелектрику порівняно з їх взаємодією у пустоті.

Цєю поляризацією і пояснюється поява дільника  $\epsilon$  у формулі Кулона, який характеризує електричні властивості діелектрика.

4) *Роль вістря на провіднику при індукції.* Якщо на незарядженому провіднику, який піддається індукції, є вістря, обернене в сторону впливаючого тіла, то різнойменний заряд, що утворюється на вістрі, не може на ньому зберегтися в наслідок великої густини заряду. Заряд немов би стікає з вістря (рис. 23), притягується до впливаючого тіла і нейтралізує відповідну частину його заряду. В результаті впливаюче тіло поступово втрачає заряд, а тіло з вістрям заряджається зарядом того ж знака.

Якщо тіло з вістрям сполучене з землею, то його заряд (однойменний порівняно з зарядом впливаючого тіла) іде в землю і дія тіла з вістрям зводиться тільки до одного — розряджати сусідні заряджені провідники<sup>1</sup>.

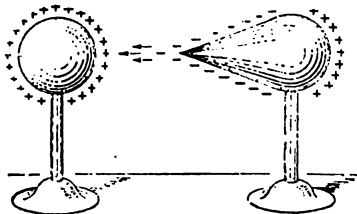


Рис. 23. Вістря на ізолюваній підставці розряджає піднесений до нього на ізолюваній підставці заряджений провідник.

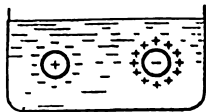


Рис. 22. Поляризація діелектриків зменшує силу взаємодії заряджених тіл.

5) *Значення громовідводу.* Громовідвід<sup>2</sup> являє собою вістря, високо підняте над будівлею, сполучене добрим металічним провідником з водоносними або вологими шарами землі. Згідно з попереднім роз'ясненням ролі вістря, сполученого з землею, громовідвід розряджає заряджені хмари, що проходять над ним.

**22. Електрофор.** На явищі індукції заснована будова прилада, який після одноразового надання йому заряду може довгий час давати заряди.

Прилад винайшов Вольта і називається він електрофорс-м. Електрофор складається з непровідного круга (ебоніт, смола, сірка тощо), на який накладається низький, порожнистий металічний циліндр з ізоляційною ручкою (рис. 24).

<sup>1</sup> Тут дано зовнішній опис явища. На ділі, до вістря притягуються проти- лежно заряджені найдрібніші частинки (див. § 100), які виникають у повітрі під впливом заряду на вістрі і які нейтралізують заряд вістря; інші ж, одна- ково з вістрям заряджені частинки, притягуються до впливаючого тіла і ней- тралізують його заряд.

<sup>2</sup> Громовідвід — історично виникла несправильна назва, слід було б назвати „блискавковідвід“.

Натираючи хутром або сукном нижній круг — ізолятор — електризують його негативно. На нього накладається металічний циліндр з ізоляційною ручкою. В наслідок шерсткості поверхонь металічний циліндр тільки в дуже небагатьох точках

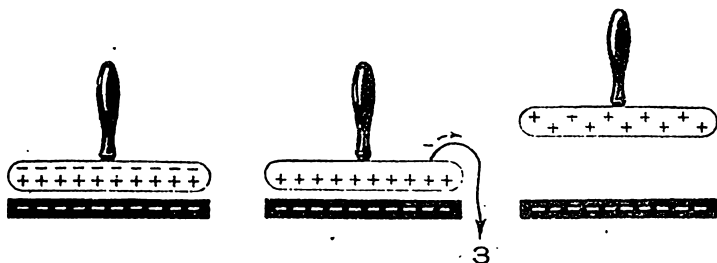


Рис. 24. Схема дії електрофора Вольта.

стикається з ізолятором; в усіх інших точках циліндр відокремлений від ізолятора повітряним проміжком. По індукції на нижній поверхні циліндра наводиться заряд, різнойменний з впливаючим, — позитивний на верхній поверхні — однойменний, негативний. Доторкнувшись на мить пальцем до металу, підводять однойменний заряд у землю; піднявши циліндр, дістають на ньому заряд, яким можна скористуватися для електризації інших тіл.

Вміщуючи знову провідник на ізоляційний круг і повторюючи ті ж операції, можна багаторазово діставати заряди на провідному циліндрі, не зважаючи на те, що заряд був наданий ізолятору тільки один раз.

При кожному роз'єднанні провідника і ізолятора доводиться затрачувати роботу на роз'єднання різнойменних зарядів, що притягуються. За рахунок затрачуваної на це роз'єднання механічної енергії і виникає потенціальна електрична енергія провідника.

**23. Електрична машина.** За принципом електрофора збудована машина для безперервного одержання зарядів, так звана електрофорна машина Уімшерста (рис. 25а).

Вона складається з двох неспровідних дисків, що обертаються однією рукояткою в протилежних напрямках. На зовнішній стороні кожного диска наклеєна велика кількість полосок з олов'яної фольги. З кожної сторони на вісь обертання над то металічний провідник, що несе на обох кінцях металічні щіточки, які доторкаються до олов'яних наклеюк на дисках. На кінцях горизонталь-

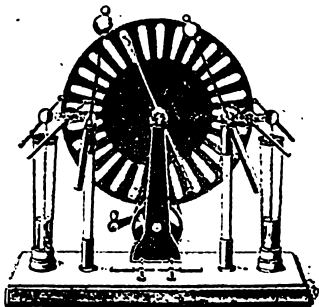


Рис. 25а. Електрофорна машина Уімшерста.

ного діаметра обидва круги охоплюються двома гребінками; кожна гребінка сполучена з окремим пересувним провідником, що закінчується ролярною кулькою. Ці останні (з допомогою ізоляційних ручок) можуть зсуватися або розсуватися на більшу чи меншу відстань.

На рисунку 256 диски і наклеївки подані у вигляді циліндрів. Диск, що має сталеві наклеївки  $A_1, A_2$ , обертається за стрілкою годинника, другий диск — наклеївками  $B_1, B_2$  обертається проти стрілки годинника;  $E_1, E_2$  і  $F_1, F_2$  — металічні піточки, сполучені з землею через провідники, розміщені паралельно діаметру кругів і, надані на вісь обертання машини;  $S_1$  і  $S_2$  — гребінки, сполучені з ролярними кульками  $K_1$  і  $K_2$ .

Припустимо, що  $B_1$ , завдяки тертю об піточку  $F_1$ , дістає малий негативний заряд. При обертанні круга проти стрілки годинника  $B_1$  поступово займе положення  $B_2$  і  $B_3$ . Тут вона знаходиться проти сполученої з землею наклеївки  $A_1$ , на якій через вплив збирається позитивний заряд з потенціалом нуль. При обертанні внутрішнього круга за стрілкою годинника заряд, що вишкає в  $A_1$ , поступово займе положення  $A_2$  і  $A_3$ ; в  $A_2$  в протилежній наклеївці зовнішнього циліндра він знову збуджує негативний заряд з потенціалом нуль, удержуючи свій низький негативний потенціал.

Збуджений через вплив на зовнішній наклеївці негативний заряд пересувається, як і перший заряд, з положення  $B_1$  в положення  $B_2$  і  $B_3$  і знову збуджує тут через вплив на внутрішній наклеївці позитивний заряд з потенціалом нуль, а сама наклеївка  $B_3$  збирає низький позитивний потенціал. Таким чином на зовнішніх наклеївках коло  $F_1$  безперервно утворюється негативна електрика і відноситься вліво, в той же час на внутрішніх наклеївках коло  $E_1$  весь час збуджується через вплив позитивні заряди і відноситься вправо.

При дальшому русі позитивні заряди внутрішніх наклеївок ідуть на гребінки  $S_1$ , через них — у ролярну кульку  $K_1$ . Негативні заряди зовнішніх наклеївок також ідуть в гребінку  $S_2$  і з неї — в  $K_2$ . Між  $K_1$  і  $K_2$  при достатній різниці потенціалів може прокочитися іскра.

Нижня половина кругів діє так само, як і верхня половина. Але на  $A_2$  утворюються коло  $E_2$  негативні, а на  $B_2$  коло  $F_2$  — позитивні заряди, які через гребінки підводяться до ролярних кульок.

Затрата механічної роботи при обертанні іде на те, щоб довести потенціал після проходження наклеївок у  $B_1, B_2$  і  $A_1, A_2$  до більш високого значення, який коло  $S_1$  і  $S_2$  дає можливість зарядам перейти на вістря.

Цими зарядами можна користуватися для різних експериментальних або технічних (наприклад медичних) потреб.

Звідки ж береться початковий заряд наклеївки?

Для початку досить найменших слів заряду від попереднього заряджання, щоб надалі відбувалося поступове посилення цього заряду. Таким чином машина діє, як сама за рядна.

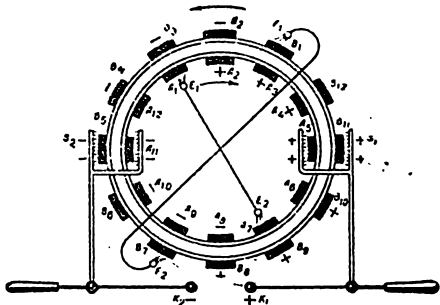


Рис. 256. Схема дії машини Уімшерста.

**24. Електроємність.** Якщо, зарядивши різні провідники однією і тією ж кількістю електрики (наприклад від електрофора), вимірюватимемо їх потенціали, то електрометр покаже, що потенціали їх будуть різні. Щоб довести різні провідники до одного й того ж потенціала, потрібні будуть різні кількості електрики. Для характеристики цієї здатності різних провідників вводиться спеціальна величина, що називається електроємністю.

*Електроємність провідника вимірюється величиною заряду, якій змінює потенціал провідника на одиницю<sup>1</sup>.*

Якщо позначити заряд провідника через  $q$ , його потенціал через  $U$  і електроємність через  $C$ , то на кожну одиницю потенціала припадає заряд  $\frac{q}{U}$ , і тоді за означенням ємності:

$$C = \frac{q}{U}, \quad q = CU \quad \text{і} \quad U = \frac{q}{C}. \quad (IV)$$

*Електроємність провідника залежить від форми і розмірів провідника. Суцільний і порожнистий провідники одного розміру і однієї форми мають однакову електроємність. Звідси видно, що маса провідника не впливає на його електроємність. Провідники однієї форми й розміру, але з різної речовини, також мають однакову електроємність. Отже, електроємність не залежить і від речовини провідника.*

25. **Одиниця електроємності.** Щоб вивести одиницю електроємності в системі CGSE, треба в попередній формулі взяти  $q$  рівним одиниці заряду CGSE,  $U$  — рівним одиниці потенціала CGSE, тоді одиниці ємності —  $\frac{\text{одиниця заряду}}{\text{одиниця потенціала}}$  CGSE.

Отже, за *електростатичну одиницю ємності береться ємність такого провідника, на якому заряд в 1 CGSE змінює потенціал на 1 CGSE.*

Щоб визначити найменування одиниці ємності в системі CGSE, треба найменування одиниці заряду  $\text{см}^{\frac{3}{2}} \text{г}^{\frac{1}{2}} \text{сек}^{-1}$  поділити на найменування одиниці потенціала  $\text{см}^{\frac{1}{2}} \text{г}^{\frac{1}{2}} \text{сек}^{-1}$ .

Отже, найменування одиниці ємності буде: *см.*

Щоб установити одиницю електроємності в практичній системі одиниць, треба покласти  $q = 1$  кулону,  $U = 1$  вольту, тоді:

$$C = \frac{1 \text{ кулон}}{1 \text{ вольт}} = 1 \text{ кулон/вольт.}$$

Ця одиниця називається *фарадою*.

Отже, за *практичну одиницю ємності, яка називається фарадою, береться ємність такого провідника, на якому заряд в 1 кулон змінює потенціал на 1 вольт.*

Через те що фарада дуже велика одиниця, то звичайно вимірювання ємності роблять у мільйонних частинах фаради; мільйонна частина фаради називається *мікрофарадою*.

Для порівняння фаради з одиницею ємності CGSE треба кулон і вольт замінити через одиниці CGSE.

$$\text{Фарада} = \frac{\text{кулон}}{\text{вольт}} = \frac{3 \cdot 10^9 \text{ CGSE}}{\frac{1}{300} \text{ CGSE}} = 9 \cdot 10^{11} \text{ CGSE} = 9 \cdot 10^{11} \text{ см.}$$

Мікрофарада дорівнює  $9 \cdot 10^5 \text{ см.}$

<sup>1</sup> При умові, що поблизу немає інших провідників.

26. Залежність електроємності провідника від сусідства інших провідників. Замінимо кульку електроскопа круглою металічною пластинкою і зарядимо електроскоп до якогось позитивного потенціала, вимірюваного кутом розходження листочків.

Якщо підносити до електроскопа другу круглу металічну пластинку, сполучену з землею, то листочки електроскопа опадають і при тому тим більше, чим ближче підноситься відведений до землі провідник (рис. 26). Опадання листочків указує на зменшення потенціала. Заряд електроскопа лишається незмінним.



3

Рис. 26. Зміна ємності електроскопа при наблизненні до нього відведеного в землю металічного круга.

З цієї спроби видно, що електроємність провідника залежить не тільки від самого провідника, а й від близькості до нього інших провідників, особливо тих, що сполучені з землею, і від властивостей навколишнього діелектрика.

Зміна ємності провідника пояснюється явищем індукції на навколишніх провідниках.

Якщо зарядити електрикою ізольовану пластинку, то заряд на обох її поверхнях розподіляється рівномірно (рис. 27).

Коли ж до неї підноситься інша, відведена до землі пластинка, то заряд першої і індуктований заряд другої, як різноіменні, притягуються і збираються на внутрішніх боках обох пластинок. Сполучати з землею потрібно для того, щоб відвести супротивний заряд другої пластинки в землю. Присутність індуктованого різноіменного заряду і знижує потенціал першого провідника.

27. Конденсатор. Наближаючи до ізольованої пластинки другу, відведену до землі, можна, як ми бачили, збільшити ємність першої; вона тепер може вмістити при тому ж потенціалі більшу кількість електрики. Тому сукупність двох провідників, відокремлених діелектриком, з яких один ізольований, а другий спо-

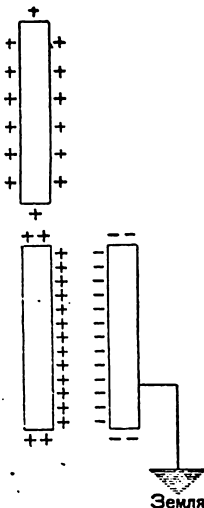


Рис. 27.

лученій із землею<sup>1</sup>, називається конденсатором<sup>2</sup>, або згущувачем.

Одне з призначень<sup>3</sup> конденсатора - збирати на ізольованій пластині при даному потенціалі більші заряди, ніж можна було б дістати на ній самій при відсутності другої пластинки.

Залежно від своєї будови конденсатори поділяються на кілька видів; найбільш уживані плоскі і циліндричні.

Плоский конденсатор складається з двох пластинок, відокремлених діелектриком. Його вид і схема зарядження подані на рисунку 27.

Теорія дає таку формулу для ємності плоского конденсатора. Якщо позначити площу пластинки через  $S$  см<sup>2</sup>, віддаль пластинок - через  $l$  см, діелектричну проникність речовини - через  $\epsilon$  і ємність конденсатора через  $C$ , то:

$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi l}$$

звідси видно, що ємність плоского конденсатора: 1) прямо пропорційна площі пластинок; 2) обернено пропорційна їх віддалі і 3) прямо пропорційна діелектричній проникності.

Другий вид часто вживаних конденсаторів - лейденська банка<sup>4</sup>.

Її зовнішній вигляд і схему зарядження дано на рисунках 28, а і б.

Лейденська банка складається з скляного циліндра (або зрізаного конуса), обклеєного зсередини і зовні

станіолом (листовим оловом). Ці листи станіолу називаються обкладками банки. Внутрішня обкладка сполучена з стрижнем, що виступає зовні і закінчується кулькою. При заряджанні банки доторкаються зарядженим тілом до стрижня, в той час як зовнішня обкладка сполучена з землею.

Для наближеного обчислення ємності лейденської банки можна користуватися формулою плоского конденсатора.

Якщо взяти якийнебудь конденсатор спершу з повітряним проміжком (або утворити між обкладками пустоту), а потім заповнити проміжок якийнебудь діелектриком, то відношення ємності конденсатора  $C = \frac{\epsilon S}{4\pi l}$  у випадку, якщо проміжок між пластинками

заповнений діелектриком, до ємності  $C_0 = \frac{S}{4\pi l}$  у випадку безповітряного простору виразиться так:

$$\frac{C}{C_0} = \epsilon, \text{ де } \epsilon \text{ -- діелектрична проникність.}$$

<sup>1</sup> Сполучення з землею не є обов'язковим в усіх випадках застосування конденсатора.

<sup>2</sup> Від латинського слова *condensare* (конденсаре) - згущати.

<sup>3</sup> Друге застосування конденсатори мають у техніці змінного струму (§ 136).

<sup>4</sup> За назвою міста Лейден, в якому вона була вперше виготовлена.

Щоб розрядити конденсатор, користуються так званим розрядником — провідником на шарнірах з двома ізоляційними ручками.

Для розрядження конденсатора один кінець розрядника прилучають до зовнішньої обкладки, а другий — наближають до внутрішньої (рис. 29). На деякій віддалі між розрядником і обкладкою проскакує іскра (причину утворення іскри див. § 103), і конденсатор розряджується.

**28. Батарея конденсаторів.** Навіть великі лейденські банки з тонкого скла заввишки 40 см і діаметром 15 см мають ємність близько 0,001 мікрофаради. Для одержання більших ємностей сполучають по кілька окремих банок. Сполучення кількох конденсаторів називається батареєю конденсаторів. Звичайно сполучають між собою окремо всі зовнішні обкладки і окремо всі внутрішні обкладки. Таке сполучення називається паралельним сполученням.

Розглянемо схему паралельного сполучення двох конденсаторів (рис. 30). Якщо зовнішні обкладки сполучені з землею, то потенціали обох зовнішніх обкладок, сполучених між собою, однакові і дорівнюють нулеві. Так само однакові потенціали  $U$  обох внутрішніх обкладок.

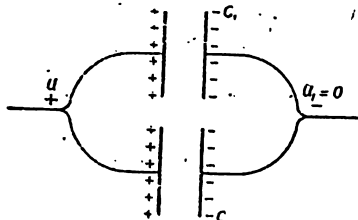


Рис. 30. Схема паралельного сполучення двох конденсаторів.

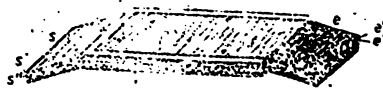


Рис. 31. Батарея плоских конденсаторів.

Батарея плоских конденсаторів дуже просто збудована, займає мало місця і тому часто вживається в техніці, зокрема в радіотехніці (рис. 31). Батарея таких конденсаторів складається з листочків станіолу, прокладених парафінованим папером. Всі непарні листи (s) сполучаються між собою і утворюють

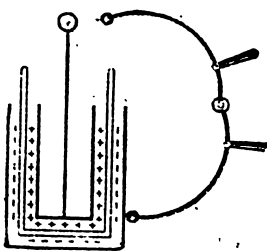


Рис. 29. Схема розрядження лейденської банки за допомогою розрядника.

Тоді заряд першого конденсатора  $q_1 = C_1 U$ , а заряд другого  $q_2 = C_2 U$ . Повний заряд батареї  $Q = q_1 + q_2 = (C_1 + C_2) U$ , де  $C_1$  і  $C_2$  — ємності окремих конденсаторів. Позначаючи ємність батареї через  $C$ , можемо написати за основою формулою  $Q = CU$ . Порівнюючи обидві попередні формули, одержуємо:

$$C = C_1 + C_2. \quad (V)$$

При паралельному сполученні конденсаторів у батарею ємність батареї дорівнює сумі ємностей всіх конденсаторів.



одну обкладку, всі парні ( $e$ ) сподучаються між собою, утворюючи другу обкладку. Батареї плоских конденсаторів при малому об'ємі можуть мати ємність в кілька десятків мікрофарад<sup>1</sup>.

**Батарея конденсаторів змінної ємності.** В наукових дослідженнях і в техніці, особливо в радіотехніці, потрібна така конструкція батареї конденсаторів, щоб можна було за бажанням безперервно міняти ємність батареї. З цією метою батареї надають спеціальної будови (рис. 32).

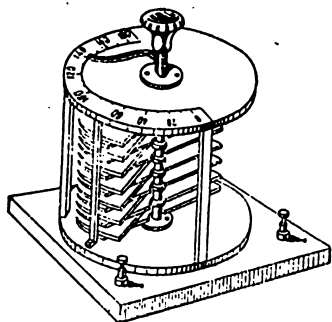


Рис. 32. Конденсатор змінної ємності.

Одні пластини — непарні — закріплюються нерухомо, парні — укріплюються на осі. Парні пластини можуть рухатися в більшій чи меншій мірі в проміжок між нерухомими пластинами. Від цього змінюється площа кожного з конденсаторів, що входять до складу батареї і, отже, їх ємність. Всування рухомих пластинок збільшує ємність батареї.

**29. Градування електрометра.** На взаємодії зарядів у плоскому конденсаторі засноване вимірювання різниці потенціалів в абсолютних одиницях.

Кружок  $B$ , вирізаний з однієї пластинки конденсатора, привішено до шальки терезів (рис. 33).

Терези, кружок  $B$  і частина верхньої пластинки, що лишилася після вирізання кружка і утворює кільце, — сполучені з землею, а нижня пластинка  $A$  сполучена з провідником, потенціал якого треба виміряти. Заряджена нижня пластинка притягує до себе кружок  $B$ . Для відновлення його попереднього положення на другу шальку терезів кладуть відповідні важки. Вага важків  $G$  вимірює силу притягання кружка  $B$ . Ця сила притягання залежить від ємності конденсатора, потенціала кружка і віддалі між пластинками  $A$  і  $B$ . Отже, вимірявши силу притягання, знаючи ємність і віддалі між пластинками, можна обчислити потенціал. З допомогою таких терезів, що називаються абсолютним електрометром, можна виміряти потенціал будь-якого провідника.

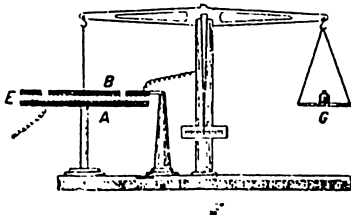


Рис. 33. Абсолютний електрометр.

Абсолютним електрометром можна скористуватися для градування таких електрометрів, у яких за показом стрілки можна відразу зробити відлік потенціала.

#### Вправа 4.

1. Чому притягання легких тіл до наелектризованого тіла відбувається краще, коли легкі тіла лежать на підставці, сполученій з землею?

<sup>1</sup> Замість парафінового паперу вживають і інші діелектрики, наприклад слюду, міканіт (суміш слюди з шеллаком), які при тій же товщині витримують без пробивання великі різниці потенціалів. Так, пробивання починається при товщині в 1 см: для слюди при 600 000 вольт, для міканіту — при 350 000, для парафіну — при 300 000, для ебоніту — при 100 000 вольт.

2. Чому при вимірюванні потенціала необхідно сполучити провідник з електроскопом довгою дриною?

3. Чому дорівнює ємність плоского конденсатора розміром в  $5 \text{ см} \times 3 \text{ см}$  з ізоляційним шаром завтовшки  $0,2 \text{ мм}$  з парафіну (слоди або повітря)?

*Відп.* Для повітря  $6,6 \cdot 10^{-5}$  мікрофаради.

4. Обчислити ємність лейденської банки діаметром в  $15 \text{ см}$  і з висотою обкладок в  $25 \text{ см}$ ; товщина скла  $5 \text{ мм}$ ; діл скла  $\epsilon = 5$ .

*Відп.*  $937,5$  ол. ємності CGSE.

5. Скільки таких банок (задача 4) треба сполучити паралельно, щоб мати ємність в  $0,01$  мікрофаради?

*Відп.* 9.

6. Батарея (паралельна) з плоских конденсаторів має розмір: довжина  $5 \text{ см}$ , ширина  $5 \text{ см}$ , висота  $3 \text{ см}$ , товщина листка сталіюлю  $0,001 \text{ см}$ , товщина пропарафіненого паперу  $0,002 \text{ см}$ . Яка ємність батареї?

7. Еталон в  $1$  мікрофараду робиться з тонких листочків сталіюлю, прокладених листочками слоюди завтовшки  $0,1 \text{ мм}$ . Чому повинні дорівнювати поверхні такого конденсатора?

8. Указати ознаки схожості і різниці між електроємністю і теплоємністю.

9. Якщо мати позитивно заряджений ізолюваний провідник, то яким способом можна зарядити дві ізолювані кулі з допомогою цього провідника, не зменшуючи його заряду, при чому на одній кулі одержати позитивний заряд, а на другій негативний?

10. Дві кулі з провідної речовини мають однаковий діаметр, при чому одна з цих куль порожниста, а друга — суцільна. Якщо надати кожній з цих куль однакового заряду, то чи будуть потенціали обох куль однакові?

### ЗАПИТАННЯ.

1. Що називається електризацією тіла?
2. Якими способами можна наелектризувати тіло?
3. Що називається провідником і непровідником електрики?
4. Як електризуються обидва напівтіла тіла?
5. В чому полягає закон Кулона?
6. Що називається діелектричною проникністю речовини?
7. Як вибрано електростатичну одиницю CGS кількості електрики?
8. Яке найменування кількості електрики в системі CGS?
9. Яке співвідношення між кулоном і електростатичною одиницею кількості електрики?
10. Як розподіляється електрика по непровіднику і провіднику?
11. Що називається об'ємною і поверхневою густинами електрики?
12. Що називається електричним полем?
13. Що називається напруженістю поля?
14. Яка формула напруженості поля і найменування одиниці CGS напруженості?
15. Що називається силовими лініями електричного поля?
16. Що таке потенціал?
17. Чому дорівнює робота по переміщенню заряду в полі?
18. В якому випадку робота сили обчислюється за допомогою різниці потенціалів?
19. Що називається екіпотенціальною поверхнею?
20. Що являють собою екіпотенціальні поверхні поля, утвореного одним точковим зарядом?
21. Як вибрано одиницю потенціала в системі CGS?
22. Яке найменування одиниці потенціала в системі CGS?
23. Яке співвідношення між вольтом і одиницею потенціала в системі CGS?
24. Як вимірюється робота по переміщенню заряду між двома екіпотенціальними поверхнями? Чи залежить ця робота від форми шляху між ними?
25. Що являє собою поверхня зарядженого провідника?
26. Що називається електрометром?
27. Що звичайно береться за нульовий потенціал?
28. Від чого залежить напрям руху електрики між двома провідниками?
29. Що називається напругою?
30. Що називається електроємністю провідника?
31. Як вибрано одиницю електроємності в системі CGS?

32. Яке найменшання одиниці електроємності в системі *CGS*?
33. Яке співвідношення між практичною одиницею електроємності і однією електроємності в системі *CGS*?
34. В чому полягає явище електростатичної індукції?
35. Як зарядити електроскоп через індукцію і який його заряд порівняно з зарядом впливаючого тіла?
36. Ізольований заряджений провідник підноситься до другого ізольованого провідника і вістря на тому боці, що повернений до першого провідника. Що вийде на другому провіднику в результаті індукції і впливу вістря?
37. Дати відповідь на запитання 36 для того випадку, коли вістря провідника буде з протилежного боку.
38. Чому легкі тіла спочатку притягуються до наелектризованого тіла, а потім відштовхуються від нього?
39. Що таке електрофор і як можна від нього дістати заряди?
40. Як збудована і як діє електрофорна машина?
41. Що називається конденсатором і від чого залежить його ємність?
42. Що називається батареєю конденсаторів?
43. Чому дорівнює ємність батареї при паралельному сполученні конденсаторів?
44. Яке призначення конденсатора?

## II. ЗАКОНИ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ.

30. Поняття про електричний струм. Якщо сполучити заряджений провідник з землею, то його електричний стан зникає. Якщо з землею сполучити дротиком негативний заряджений провідник (рис. 34, а), то електрони, що знаходяться на провіднику у великій кількості, в наслідок взаємного відштовхування починають розміщатися по всіх сполучених між собою провідниках: на даному зарядженому провіднику, на проводі, який сполучає його з землею, і на землі. Але через те що земля незмірно велика порівняно з іншими провідниками, то в дійсності весь надмір негативного заряду йде в землю, і провідник виявляється нейтральним.

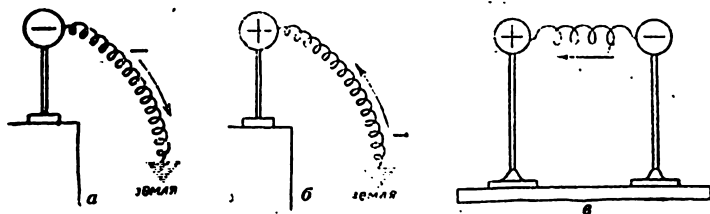


Рис. 34.

Якщо ж з землею сполучається проводом позитивно заряджений провідник (рис 34, б), то вільні електрони землі, притягаючись позитивним зарядом, перейдуть на заряджений провідник у такій кількості, що вони нейтралізують його позитивний заряд, і провідник знову ж таки буде розрядженим. Таке ж переміщення електронів відбувається також при сполученні одного зарядженого провідника з іншим, протилежно зарядженим або незарядженим (рис. 34, в). Тільки в цьому випадку заряд першого наелектризованого провідника може не зникнути остаточно.

Орієнтоване переміщення електричних зарядів називається електричним струмом. Отже, електричний струм у металах створюється електронами, що рухаються в одному напрямі. Далі ми побачимо, що в інших провідниках і півпровідниках електричний струм може створюватися рухом не тільки електронів, а й інших заряджених частинок, як тих, що несуть позитивний заряд, так і тих, що несуть негативний заряд.

Переміщення електричних зарядів триває доти, поки не вирівняються потенціали. Якщо весь час підтримувати цю різницю потенціалів, то струм буде існувати довгий час.

Таке безперервне підтримування різниці потенціалів на кінцях провідника можна, наприклад, здійснити, якщо сполучити їх з двома безперервно натираними тілами.

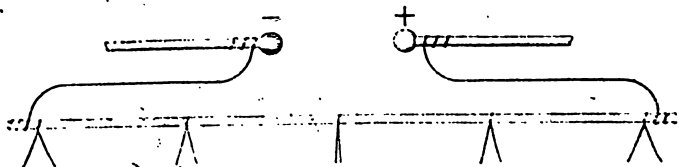


Рис. 35. Зміна потенціала вздовж кола.

Якщо постійно надавати електростатичними способами, наприклад з допомогою електрофорної машини, одному провіднику позитивний заряд, другому -- негативний, сполучити їх півпровідником, -- довгою вологою в'язкою (рис. 35) -- і підтримувати між цими провідниками незмінну різницю потенціалів, то можна спостерігати безперервну зміну потенціала вздовж кола струму. Привісивши паперові електроскопи в різних місцях кола, можна бачити, що у позитивно зарядженого провідника розходження листочків найбільше, далі кут між листочками поступово зменшується, посередні кола перетворюються в нуль і потім знову починає рости до негативно зарядженого провідника. Випробування позитивно зарядженою паличкою показує, що в першій частині кола потенціали позитивні, в другій -- негативні.

Якщо в описаній спробі сполучити з землею негативно заряджений провідник, то вздовж кола встановлюється зміна потенціала від його найбільшого значення на позитивно зарядженому провіднику до нуля в точці сполучення з землею. Якщо сполучити з землею позитивно заряджений провідник, то потенціал вздовж кола змінюється від нуля на позитивно зарядженому провіднику до найбільшого щодо абсолютної величини негативного потенціала на негативно зарядженому провіднику.

Потенціал у кожній точці провідника можна виміряти електрометром, якщо сполучити його тонкою дратвиною з досліджуваною точкою провідника, а оболонку електрометра сполучити з землею. Різницю потенціалів у двох точках кола можна виміряти, якщо електрометр сполучити з однією точкою кола, а оболонку -- з іншою.

Отже, на всьому протязі кола, від найбільшого потенціала до найменшого потенціала, відбувається безперервне спадання потенціала. Між кінцями будьякої ділянки кола існує певна різниця потенціалів, яка і називається напругою на цій ділянці кола.

Треба пам'ятати, що різниця потенціалів між кінцями ділянки або, що те ж саме, напруга на цій ділянці завжди чисельно дорівнює тій роботі, яка виконується джерелом струму для просування одиниці кількості електрики на розгляданій ділянці кола.

Крім тертя і електростатичної індукції, є ще хімічний спосіб відокремлення електричних зарядів. Прилади, що дають можливість безперервно підтримувати різницю потенціалів хімічним способом, називаються хімічними генераторами<sup>1</sup>, або гальванічними<sup>2</sup> елементами. Їх будова розглядається в дальших параграфах.

Крім того, з початкового курсу відомо, що як джерело струму застосовуються ще динамомашини.

### 31. Хімічний спосіб електризації.

В 1800 р. Вольта (1745 — 1827) відкрив, що можна дістати різнорідні електричні заряди на двох пластинках різних металів, якщо вмістити їх у розчин кислоти або солі. Явище хімічної електризації пояснюється тепер на основі електронної теорії речовини.

За сучасними поглядами в усякому розчині, що проводить електрику; майже всі молекули розчиненої речовини при самому розчиненні розпадаються на дві частини (рис. 36).

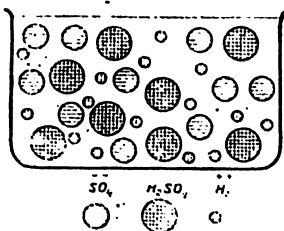


Рис. 36. Схема електролітичної дисоціації.

Обидві ці частини не лишаться нейтральними, але несуть на собі рівні і різноманітні електричні заряди. Одна з них (атом водню, металу, група  $NH_4$  та ін.) при розпаді молекули втрачає частину електронів і стає позитивно зарядженою; друга дістає надмір електронів і буває зарядженою такою ж кількістю негативної електрики.

Атом або група атомів, яка несе на собі електричний заряд, називається іоном<sup>3</sup>. Розпад молекули на іони при розчиненні називається електролітичною дисоціацією<sup>4</sup>.

У розчині одночасно знаходяться і іони і цілі молекули, які перебувають у тепловому русі.

У розчині одночасно відбуваються два протилежних процеси. Протилежно заряджені рівними кількостями електрики іони можуть притягатися і відновлюватися в нейтральні молекули

<sup>1</sup> Генератор — виробник.

<sup>2</sup> За ім'ям італійського лікаря Гальвані (1737 — 1798), що перший звернув увагу на ті явища, які дежуть в основі будови елементів. Правильніше було б надати їм назву вольтайчних на честь Вольта — винахідника першого елемента.

<sup>3</sup> Іон — грецьке слово, означає ідущий.

<sup>4</sup> Дисоціація — латинське слово, означає роз'єднання.

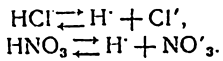
(явище, що називається молізацією). В той же час інші нейтральні молекули розпадаються на іони.

Високий ступінь дисоціації у воді солей, кислот і лугів пояснюється великою діелектричною проникністю води, рівною приблизно 80. Сили електричної взаємодії, за законом Кулона, між різноорідно зарядженими частинами молекули в воді у 80 раз слабші (§ 6), ніж у повітрі (пустоті).

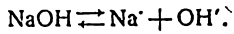
Тому вже теплового руху молекул води досить, щоб спричинити розпад молекули розчиненої речовини на два іони.

Умовимося зображати надмір одного електрона (один елементарний негативний заряд) через одну рисочку ( $\overset{\ominus}{\text{Cl}}$ ), двох електронів — двома рисочками ( $\overset{\ominus\ominus}{\text{O}}$ ), недостачу одного електрона (один елементарний позитивний заряд) — точкою вгорі ( $\overset{\oplus}{\text{Na}}$ ), недостачу двох електронів — двома точками вгорі ( $\overset{\oplus\oplus}{\text{Cu}}$ ), процес дисоціації і молізації позначимо значком  $\rightleftharpoons$ .

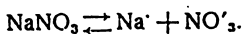
Кислоти дисоціюють на іони водню і іони кислотного залишку:



Луги дисоціюють на іони металу і іони водного залишку (гідроксил):

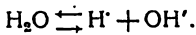


Солі дисоціюють на іони металу і іони кислотного залишку:



Іони відрізняються деякими своїми властивостями від нейтральних атомів; так, іон  $\overset{\oplus}{\text{Na}}$  не сполучається з водою на відміну від атома Na.

Вода також дисоціює в дуже малій мірі:



При зануренні цинкової пластинки у розчин сульфатної кислоти між цинком і розчином виникає особлива взаємодія, внаслідок якої атоми цинку переходять у розчин. Це прагнення іонів перейти в розчин виявляється в так званій пружності розчинення. Але при переході в розчин атом цинку лишає на пластинці два електрони і стає позитивним іоном цинку. *Цинкова пластинка, збагачуючись вільними електронами, дістає негативний заряд.*

*Метал заряджається негативно, рідина — позитивно.*

Перехід відбувається доти, поки між металом і розчином не виникає різниці потенціалів, достатньої для того, щоб перешкодити дальшому розчиненню металу, тобто зрівноважити пружність розчинення.

Між металічною пластинкою, опущеною в розчин, і розчином виникає різниця потенціалів. Ця різниця потенціалів залежить від роду металів і роду розчину.

**32. Хімічні джерела струму.** Щоб з допомогою хімічного способу електризації дістати джерело струму, треба у розчин занурити дві різні металічні пластинки (одна може бути вугільною).

Посудина, що містить розчин кислоти і дві різні металічні пластинки, являє собою найпростіше хімічне джерело струму, або елемент (рис. 37).

Якщо, наприклад, в розчин сульфатної кислоти, куди опущена цинкова пластинка, опустити мідну, то мідна пластинка має порівняно з цинковою дуже слабу пружність розчинення; тому різниця потенціалів між мідною пластинкою і розчином менша, ніж між цинковою пластинкою і тим же розчином.

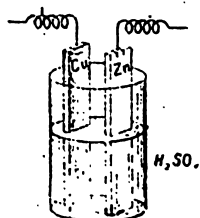


Рис. 37. Елемент Вольта.

В наслідок цього між цинковою і мідною пластинками, опущеними в слабій розчин сульфатної кислоти, існуватиме певна різниця потенціалів. Її можна виміряти чутливим електрометром. Вона приблизно дорівнює 1 вольту.

Мідну пластинку, що має вищий потенціал, називають позитивним полюсом елемента; цинкову, що має нижчий потенціал, називають негативним полюсом. В усіх елементах, до яких входить цинк, він є негативним полюсом.

Якщо сполучити металічним провідником цинкову і мідну пластинки, то легкорухомі електрони цинкової пластинки направляються по провіднику до мідної пластинки в сторону більшого потенціала. Ухід електронів з цинкової пластинки порушить рівновагу, яка до цього існувала між різницею потенціалів цинку і рідини, з одного боку, і пружністю розчинення цинку, з другого боку. Почнеться перехід у розчин іонів цинку, який і відновлюватиме порушену рівновагу.

З другого боку, електрони, що притекли до мідної пластинки, також порушуватимуть рівновагу між пружністю розчинення міді і різницею потенціалів мідь-рідина (різниця потенціалів збільшуватиметься). Для відновлення рівноваги електрони мідної пластинки будуть переходити на позитивні іони, що знаходяться в розчині поблизу мідної пластинки, і перетворювати їх в атоми.

Всередині розчину відбуватиметься рух іонів — позитивних в сторону мідної пластинки і негативних — в сторону цинкової.

Отже, у всьому замкненому колі встановлюється безперервний направлений рух електричних зарядів, або електричний струм. Струм триватиме доти, доки відбуватиметься хімічний процес розчинення цинку. Він утворюється за рахунок хімічної енергії речовин, що вступають в хімічну взаємодію.

Різниця потенціалів на полюсах незамкненого провідником гальванічного елемента вимірює так звану електрорушійну силу елемента, або скорочено — ЕРС. *Електрорушійна сила джерела струму показує ту роботу, яку може затратити.*

джерело струму на просування в замкненому колі кожної одиниці електрики.

Описаний вище елемент винайшов Вольта.

Крім описаного елемента Вольта, є гальванічні елементи інших систем і вторинні елементи, або так звані акумулятори.

Останні дістають запас хімічної енергії від інших генераторів, і тільки потім, в міру потреби, перетворюють цю хімічну енергію в електричну. Про них також відомо з початкового курсу; опис їх дано в § 94.

Кожний генератор будьякого типу має певну ЕРС, яка може бути безпосередньо виміряна в незамкненому стані його.

Прилади для вимірювання різниці потенціалів у колі електричного струму звичайно градууються на вольти і тому називаються вольтметрами. При цих вимірюваннях вживаються вольтметри, будова яких схожа на будову амперметрів, відомих в основних рисах з курсу VII класу.

Схематичне зображення вольтметра і спосіб його вмикання в коло подані на рисунку 45.

ЕРС хімічного джерела струму не залежить від розмірів елемента, а тільки від тих речовин, з яких складається елемент.



Вольта<sup>1</sup> (1745 — 1827).

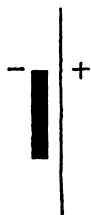


Рис. 38. Схематичне зображення хімічного джерела електричного струму.

Якщо взяти ряд хімічних джерел однієї і тієї ж будови, але з пластинами різного розміру, з різними віддалями між пластинами і т. ін. і виміряти їх ЕРС, то вони будуть однаковими. Різниця потенціалів на полюсах незамкненого елемента залежить від хімічних процесів між речовинами елемента, а ці процеси не залежать від розмірів останнього.

Хімічне джерело струму зображається схематично на рисунку двома рисочками (рис. 38): короткою й товстою (—), довгою і тонкою (+).

**33. Електричне коло і напрям струму.** Сукупність джерела струму (генератора), споживача (приладів, що споживають струм, наприклад, електричних лампочок, електромоторів), підвідних проводів і приладів для вмикання і вимикання струму називається колом електричного струму. В металічних провідниках

<sup>1</sup> Вольта Олександр народився в Комо в Італії: в 1779 р. — професор фізики в Павії. В 1781 р. він винайшов солом'яний електрометр, в 1782 — конденсатор, зв'язаний з електроскопом, — електрофор.

Головна заслуга Вольта полягає в тому, що він відкрив виникнення різниці потенціалів при стиканні двох металів і своїми дослідями спростував висунуту



треба розрізнити дійсний і умовний (технічний) напрями струму. *Дійсним напрямом струму в металах є напрям руху електронів.* Електрони рухаються по зовнішній дільниці кола від негативного полюса до позитивного.

*За технічний напрям струму в металічному провіднику береться напрям, протилежний дійсному переміщенню електронів по зовнішній дільниці кола — від позитивного полюса до негативного.*

У розчинах солей, кислот і лугів за технічний напрям струму беруть напрям руху позитивних іонів; отже, всередині гальванічного елемента технічний напрям струму збігається з напрямом від негативного полюса до позитивного.

*Коли в науці або техніці говорять про напрям електричного струму, то при цьому завжди мають на увазі саме технічний напрям.*

Такий вибір напрямку струму є результатом історичного розвитку учення про електричний струм, бо цей вибір був зроблений за сто з лишком років до відкриття електронів.

Умовний, або технічний, напрям зберігається в науці тому, що всі закони і правила, зв'язані з напрямом струму і виведені за час столітнього розвитку учення про струм, належать саме до цього на початку прийнятого напрямку.

Треба пам'ятати, що ні один генератор не створює сам по собі електричних зарядів; він тільки приводить електричні заряди в рух. Так тепла енергія топки котла водяного опалення тільки спрямовує течію води у певному напрямі.

**34. Величина струму.** *Величина струму вимірюється кількістю електрики, яка проходить через поперечний переріз кола за одну секунду.*

Якщо позначити кількість електрики, що пройшла через переріз<sup>1</sup> кола, через  $Q$ , час проходження — через  $t$  і величину струму — через  $I$ , то на підставі даного вище означення:

$$I = \frac{Q}{t}; \quad (VIa)$$

$$Q = It. \quad (VIб)$$

**35. Одиниця величини струму.** Якщо в попередній рівності (VIa) взяти  $Q = 1$  кулон, час  $t = 1$  секунди, то:

$$I = \frac{1 \text{ кулон}}{1 \text{ сек}} = 1 \text{ кул/сек} = 1 \text{ амперу.}$$

Гальвані теорію тваринної електрики, яка проявляється нібито тільки при сполученні металом м'яза і нерва організму. Вольта винайшов хімічне джерело струму, назване гальванічним елементом, замість правильнішої назви „вольтаїчного“, і побудував вольтові стовпи — батарею значної електрорушійної сили.

<sup>1</sup> Під поперечним перерізом розуміють величину площі, одержаної від перетину провідника площиною, перпендикулярною до його довжини.

*За одиницю величини струму береться така величина постійного струму, при якій через поперечний переріз кола проходить 1 кулон за 1 секунду.*

Ця одиниця називається ампер, на честь знаменитого французького фізика Ампера. Величина струму вимірюється приладами, що називаються амперметрами, в загальних рисах відомим з початкового курсу; будова їх описана в § 85; вмикання в коло схематично зображене на рисунку 45.

36. *Постійність величини струму в усіх перерізах кола. Коло може бути складене з дільниць дуже різноманітних перерізів, наприклад, широка банка гальванічного елемента, товсті циліндричні клеми, проводи, товстий прямокутний ніж рубильника, найтонший волосок жарової лампочки. Вимірні прилади, розставлені по різних дільницях кола, показують, що величина струму через перший - ліпший переріз даного кола завжди однакова. Цей результат легко передбачити. Якби через якийнебудь переріз, наприклад, при переході від товстого металічного провідника до тонкого, відходила щосекунди менша кількість електрики, ніж приходила, то на цій границі утворилося б безперервне нагромадження електричних зарядів, що ніде в колі не спостерігається. Так само і у водній або газовій течії, що встановилася, через будьякі перерізи труб — широкі й вузькі — проноситься за одиницю часу однакова кількість речовини.*

37. *Опір провідника. Електричний струм складається з рухомих електронів у металах і з рухомих іонів у розчинах солей, кислот і лугів. Електрони, що беруть участь у струмі, переміщуються в металічних провідниках серед атомів і залишків атомів, які самі не мають поступного руху, а знаходяться в коливному тепловому русі. Під час свого переміщення електрони стикаються з атомами, залишками атомів та іншими електронами; при цьому вони втрачають частину своєї енергії. Тому електрони немов би зазнають у колі струму опір своєму рухові. Для вимірювання опору різних речовин встановлена одиниця опору, що називається омом на честь німецького фізика Ома.*

*За одиницю опору, що називається 1 омом, в практичній системі одиниць береться опір такого відрізка провідника, по якому йде струм в 1 ампер при напрузі на ньому з 1 вольт.*

Для вимірювання всіх величин, що характеризують коло: величини електричного струму, напруги, опору, треба було створити зразки, або еталони, одиниць вимірювання.

На протязі вікового розвитку вчення про електричний струм в різний час і різними ученими пропонувались різні еталони.

Для внесення однакості у вимірюваннях в 1908 р. Міжнародний конгрес електриків у Лондоні обрав міжнародну електротехнічну комісію, яка визнала основними одиницями ампер і ом, а вольт прийняла за похідну одиницю; комісія дала міжнародне визначення ампера<sup>1</sup> і ома.

<sup>1</sup> Визначення міжнародного ампера дано в § 89.

За міжнародний ом взято опір ртутного стовпа завдовжки 106,3 см і перерізом в  $1 \text{ мм}^2$  при  $0^\circ$ .

Вважають, що два провідники мають однакові опори, якщо при з'єднанні одного провідника іншим величина струму в даному колі лишається незмінною. Тому є можливість готувати зразки (еталони) ома не тільки з ртуті, а й з різних металів.

Звичайно зразки опору готуються з манганінового (84 частини Cu; 4 — Ni; 12 — Mn) дроту, намотаного у формі котушки (рис. 39).

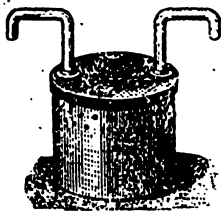


Рис. 39. Еталон опору

Як можна добрати через заміщення зразок опору в 1 ом, так само можна добрати опори в 2, 3 і т. д. оми або в  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{4}$ , 0,1, 0,01 і т. д. ома.

38. Закон опору провідника. Вимірюючи способом заміщення опір провідника з однієї і тієї ж речовини, але при різних довжинах, поперечних перерізах і температурах або опори провідників різних речовин при однакових довжинах, перерізах, температурі, можна вивести такий закон опору провідника:

**Опір провідника:** 1) прямо пропорціональний довжині; 2) обернено пропорціональний площі поперечного перерізу; 3) залежить від речовини провідника; 4) з підвищенням температури підвищується для металічних провідників, спадає для вузлів, розчинів солей і кислот.

Для більшості чистих металів приріст опору при нагріванні на  $1^\circ$  становить близько  $0,4\%$  від опору при  $20^\circ \text{C}$ . Це число називається температурним коефіцієнтом опору.

При вдалому доборі складових частин можна скласти стони з дуже малою зміною опору при зміні температури<sup>2</sup>. Проводи з таких сплавів застосовуються в тих приладах, де потрібна сталість опору, наприклад, в еталонах опору.

Дослідження показали, що різні речовини при однакових умовах мають різні опори, тому для порівняння опору різних речовин застосовується спеціальна величина, що називається питомим опором.

39. Питомий опір речовини. Питомий опір речовини вимірюється опором в омах провідника з цієї речовини завдовжки в 1 с і площею поперечного перерізу в  $1 \text{ см}^2$ .

<sup>1</sup> Власне міжнародний ом визначено в таких словах: „Міжнародний ом — опір при незмінному електричному струмі і при температурі талучого льоду ртутного стовпа завдовжки 106,300 см, який має переріз, однаковий по всій довжині, і масу в 1445,21 г”.

Обчислюючи за масою ртуті, її густиною і довжиною ртутного стовпа переріз цього стовпа, знайдемо, що він дорівнює  $0,01 \text{ см}^2$ .

<sup>2</sup> Такі, наприклад, стони: нікелін (міді 54%, нікелю 26%, цинку 20%) — температурний коефіцієнт 0,02%; константан (міді 58%, нікелю 41%, марганцю 1%) — коефіцієнт 0,003%; манганін (міді 84%, нікелю 4%, марганцю 12%) — коефіцієнт 0,001%...

В техніці питомий опір вимірюється опором в омах провідника завдовжки в 1 м і площею поперечного перерізу в 1 мм<sup>2</sup>. Технічний питомий опір в 10000 раз більший фізичного.

Питомий опір позначається буквою  $\rho$  (грецька буква, вимовляється *ро*).

Таблиця технічних питомих опорів речовин.

Срібло (прожарене)	0,016	Сталь м'яка	0,18
Мідь (провідникова)	0,0175	Свинець	0,21
Алюміній (прожарений)	0,029	Нейзильбер	0,3
Вольфрам	0,056	Нікелін	0,4
Цинк (пресований)	0,060	Сталь загартована	0,4
Нікель	0,080	Манганін	0,43
Латунь	0,08	Константан	0,5
Платина (прожарена)	0,1	Ртуть	0,94
Залізо (дротове)	0,13	Вугілля	40—60
10-процентний розчин сульфатної кислоти	26 000	Мрамур	$4 \cdot 10^{15}$
їдкого калію	37 000	Слюда	$4 \cdot 10^{17}$
нашпиту	56 000	Скло	$5 \cdot 10^{17}$
мідного купоросу	313 000	Фарфор	$3 \cdot 10^{18}$
Шифер	$1 \cdot 10^{12}$	Ебоніт	$1 \cdot 10^{22}$

40. Формула опору провідника. Якщо позначити питомий опір через  $\rho$ , довжину провідника через  $l$ , площу поперечного перерізу через  $S$  і опір провідника через  $R$ , то на підставі § 38 одержимо:

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (\text{VIIa})$$

Якщо для  $\rho$  взято питомий опір, визначений в оме-сантиметрах<sup>1</sup>, то довжина провідника повинна бути виражена в сантиметрах і поперечний переріз — в квадратних сантиметрах; якщо виражає технічний питомий опір, то довжина виражається в метрах, площа перерізу — в квадратних міліметрах.

Залежність опору від температури можна також виразити формулою. Якщо позначити питомий опір через  $\rho$ , температурний коефіцієнт, тобто приріст кожної одиниці питомого опору при нагріванні на 1°, через  $\alpha$ , то приріст усього питомого опору при нагріванні на 1° виражатиметься через  $\rho\alpha$ ; зміна ж питомого опору при нагріванні на  $t$ ° буде  $\rho\alpha t$  і питомий опір  $\rho_t$  при температурі на  $t$ ° вищий від тієї, для якої дано табличні значення, буде рівний  $\rho_t = \rho + \rho\alpha t = \rho(1 + \alpha t)$ . Звідси:

<sup>1</sup> З формули (VIIa)  $\rho = \frac{RS}{l}$ . При  $l = 1$  ому,  $S = 1$  см<sup>2</sup> і  $l = 1$  см,  $\rho = 1 = \frac{0\text{м} \cdot \text{см}^2}{\text{см}} = 1$  ом·см. Якщо взято фізичне значення питомого опору, то він виражається в оме-сантиметрах.

В технічній системі:  $R = 1$  ому,  $S = 1$  мм<sup>2</sup>,  $l = 1$  м, тоді  $\rho = \frac{0\text{м} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$

Найменування одиниці технічного питомого опору  $\frac{0\text{м} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$

$$R_t = \frac{\rho l}{S} (1 + \alpha t)$$

(VIIб)

Якщо в коло ввімкнено рідкий провідник, то за його поперечний переріз береться площа зануреної частини електрода<sup>1</sup>, а за його довжину — віддаль між паралельно поставленими електродами.

#### Вправа 6.

- Обчислити опір 1 км залізного телеграфного провода перерізом у 8 мм<sup>2</sup>.  
Відп. 16,25 ома.
- Який треба вибрати переріз мідного провода, щоб він при довжині в 125 м мав опір в 0,44 ома?  
Відп. 5 мм<sup>2</sup>.
- З нікелінового дроту діаметром в 0,3 мм виготовлено опір в 2 оми. Яка довжина дроту?  
Відп. 0,353 м.
- Який опір 1 км мідного дроту діаметром в 0,8 мм? Густина міді 9,9  $\frac{г}{см^3}$ .  
Відп.  $\approx 8$  омів.
- Визначити опір 10-процентного розчину мідного купоросу, якщо в посудині розмір електродів 10 см<sup>2</sup>, а віддаль між ними 1 см.  
Відп. 3,13 ома.
- Струм від трамвайної електростанції іде по верхньому голому проводу через дугу вагона, вагонний електромотор і рейки назад до станції. Знайти опір верхнього провода і рейки, якщо вагон знаходиться на віддалі 1 км від станції, якщо верхній провід зроблено з твердолопнутої міді з питомим опором  $\rho = 0,0314$  і діаметром  $D = 1$  см, а рейки — із сталі з питомим опором  $\rho = 0,15$  і перерізом  $S = 30$  см<sup>2</sup>.  
Відп. 0,45 ома.
- Визначити (без термометра) температуру обмотки машини, якщо до пропускання струму вона мала опір в 150 омів при температурі повітря в 20°, а після роботи опір її став 180 омів. Провід — мідний з температурним коефіцієнтом  $\alpha = 0,004$ .  
Відп. 74°.

41. Надпровідність. Для чистих металів при охолодженні на 1° опір зменшується в середньому на 0,004, або  $\approx \frac{1}{273}$ . Через це можна було думати, що в міру наближення температури металів до абсолютного нуля ( $-273^\circ\text{C}$ ) їх опір поступово також спадатиме до нуля. Але спроби, принаймні, з деякими металами, охолодженими зрідженими газами, показали інше явище. Питомий опір свинцю при поступовому охолодженні до  $7,3^\circ$  абсолютної температури справді поступово зменшувався, але при дальшому охолодженні навіть на  $0,01^\circ$  він раптово і різко спадав до зникаюче малої величини, стаючи в  $10^{10}$  раз меншим опором

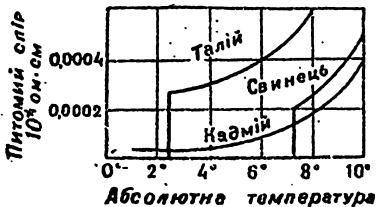


Рис. 40. Діаграма залежності опор металів від температури.

при кімнатній температурі (рис. 40).

Явище зниження питомого опором до дуже малої величини,

<sup>1</sup> Електродами називаються частини кола (звичайно у формі пластин), занурені в рідкий провідник або газ. Звичайно, мають на увазі, що обидва електроди мають однакову площу, в противному разі виходить провідник з неперервно змінним перерізом, і обчислення опором ускладнюється.

що спостерігається у деяких металів при температурах, близьких до абсолютного нуля, називається надпровідністю. Його відкрив Каммерлінг-Оннес.

42. Зв'язок електропровідності з теплопровідністю. Однаково правильно буде, якщо сказати про якийнебудь провідник, що він має малий опір або що він добре проводить електрику. Чим більший опір, тим менша електропровідність, і навпаки. Якщо питомий опір речовини позначається буквою  $\rho$ , то її питомая електропровідність виразиться величиною  $\frac{1}{\rho}$ . Взагалі електропровідність всякого провідника з опором  $R$  позначатиметься  $\frac{1}{R}$ .

Якщо порівняти таблиці<sup>1</sup> електропровідності і теплопровідності, то можна помітити, що найбільш електропровідні речовини виявляються в той же час і найбільш теплопровідними (срібло, мідь).

Це співвідношення наводить на думку про те, що в передачі теплоти тілом через теплопровідність беруть участь електрони.

43. Внутрішній опір джерела струму. Рух електричних зарядів зустрічає опір не тільки в провідниках, з яких складається зовнішня частина кола, але й всередині джерела струму, зокрема всередині хімічного джерела. Складемо коло з елемента Вольта, провідників і амперметра. При замиканні кола амперметр відмітить якусь величину струму. Якщо, не змінюючи зовнішньої ділянки кола, почати розсувати пластинки елемента, то амперметр покаже зменшення величини струму; вона також зменшуватиметься і при поступовому вийманні пластини з рідини.

При глибшому зануренні пластин у рідину або при зближенні їх величина струму збільшується. Покази амперметра свідчать, що в першому випадку опір джерела збільшується, в другому — зменшується. Значить, існує опір всередині самого гальванічного елемента: Опір джерела струму називається внутрішнім.

Внутрішній опір підлягає загальним законам опору провідників.

44. Реостати. В техніці часто доводиться робити поступову зміну величини струму, наприклад, при пуску електричних моторів, при вимкнанні сильних струмів, при зміні освітлення в театрах тощо. Змінювати величину струму можна, міняючи опір кола. Прилади, що дають можливість вводити в коло електричного струму змінюваний опір, називаються реостатами.

Найуживаніші форми реостатів такі:

1. Реостат з рухомою ручкою. На рамі (рис. 41) нагнуті спіралі з дроту різного опору, сполучені між собою. Один кінець кола прилучається до початку першої спіралі; другий кінець сполучений з ручкою. Струм проходить по реостату ту чи іншу віддаль залежно від положення ручки. При показаному на рисунку 41 положенні струм проходить через ланки

<sup>1</sup> Перелік металів в порядку спадної теплопровідності: срібло, мідь, золото, алюміній, цинк, платина, нікель, свинець. Таблиця питомих опорів речовин в § 39.

$ka_1b_1, a_2b_2, a_3b_3$ . Переміщаючи ручку, можна вмикати різну кількість спіралей, чим можна в широких межах міняти опір (але стрибками) і, отже, величину струму. Цей вид реостата вживається переважно в технічних установках.

2. Реостат з ковзним контактом. Коли треба, наприклад в наукових дослідженнях, повільно і поступово, дуже малими стрибками, змінювати величину струму, вживають реостат з ковзним контактом. Він складається з ізолятора (рис. 42),

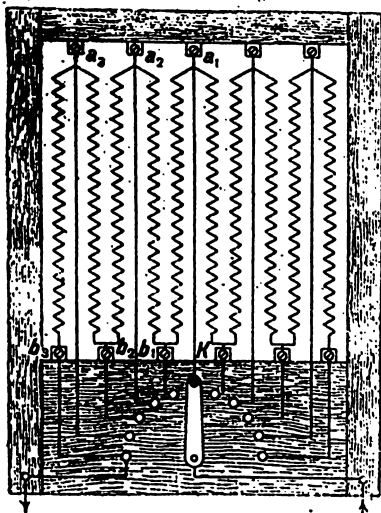


Рис. 41. Реостат з рухомою ручкою.

на який намотано близькими, але нестичними рядами, голій дрiт. Над ним по стрижню переміщається металічний повзунк, що щільно до нього притискується (ковзний контакт). Один кiнець кола прилучається до кiнця дроту, другий через стрижень до ковзного контакта; по реостату струм проходить тільки по тих витках, якi знаходяться між кiнцем дроту, ввiмкненим в коло, i контактом. Переміщаючи контакт, можна змінювати число ввiмкнених виткiв дроту i, отже, опiр:

Переводом контакта з одного витка дроту на сусідній можна змінювати опір на першу-ліпшу малу частину ома, залежно від вибору дроту.

3. Штепсельний реостат (магазин опорів). Попередні форми реостатів швидше призначені для зміни опору, а не

для його вимірювання. Якщо ж треба щоразу точно знати величину опору, що вводиться, то тоді реостати роблять у формі ящика, в якому знаходиться набір котушок з дроту, що мають різні, цілком певні, опори (рис. 43). Реостати такого типу називаються магазинами опорів, або штепсельними реостатами. На верхній кришці прироблені товсті мідні штаби, відокремлені проміжками, в які вставляються штепселі. Кінці кожної з послідовно розміщених котушок опору прикріплені до двох сусідніх пластинок (рис. 44). Коли в проміжки між пластинками вставлені металічні штепселі, що сполучають пластинки в один суцільний провідник, струм іде тільки по цих пластинках, минаючи котушки опору, бо пластинки чинять дуже малий опір струмові. Коли ж вийнято один або кілька штепселів, струм проходить через увiмкнені між проміжками опори, величина яких написана у відповідному місці кришки ящика. На рисунку 44 ввiмкнено опори I i III, а II ввiмкнено.

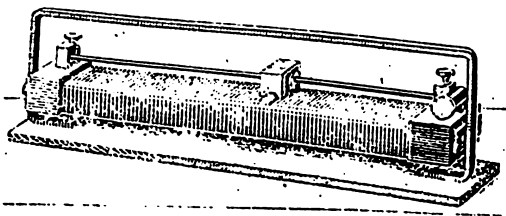
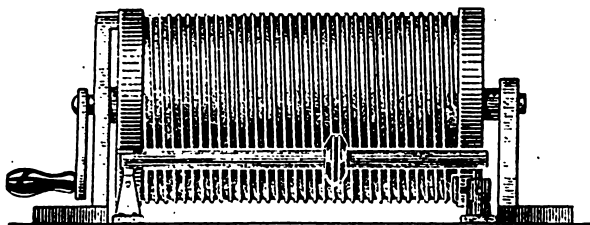


Рис. 42. Реостат з ковзним контактом.

Кінці кола прилучаються до затискачів штепсельного реостата.

45. Закон Ома. ЕРС джерела ще не визначає величини струму в колі.

Спроби показали, що від одного й того ж джерела, ввімкненого в різні кола, проходять різні струми. ЕРС джерела показує тільки, яку кількість енергії може дати джерело для просування по колу кожного кулона електрики. Число ж кулонів, що справді проходять щосекунди через будьякий переріз кола, тобто величина струму, залежить, крім ЕРС джерела, також і від опору самого кола.

Як залежить величина струму в колі від тієї енергії, яку може дати джерело для просування кожного кулона, і від опору кола, було досліджено німецьким ученим Омом в 1828 р. і виражено у формі закону, відомого під назвою закону Ома для повного кола.

Установимо спершу залежність між опором і величиною струму при одній і тій же напрузі на ділянці кола (або різниці потенціалів на кінцях його).

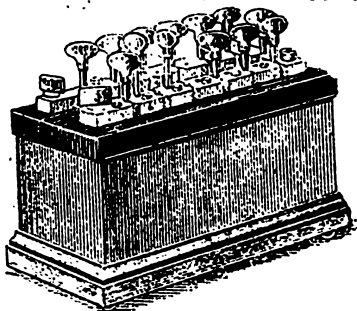


Рис. 43. Зовнішній вигляд штепсельного реостата.

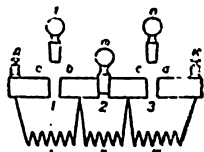


Рис. 44. Схема внутрішньої будови штепсельного реостата.



Складемо коло за схемою рисунка 45, на якому  $R$  зображає реостат з рухомих контактом,  $A$  — амперметр,  $V$  — вольтметр. Опір  $r$  між точками  $B$  і  $C$  міняється під час спроби. Для нього можуть бути добрані дротини, опори яких попередньо вимірюються методом заміщення з допомогою магазину опор.

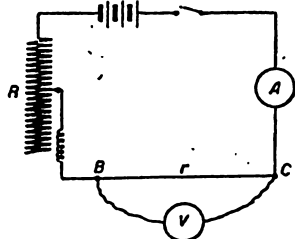


Рис. 45. Схема установки для експериментального виведення закону Ома.

При кожному увімкненні нового опоры  $r$  рухомий контакт реостата  $R$  переміщується так, щоб напруга (різниця потенціалів між точками  $B$  і  $C$ ) на досліджуваній ділянці лишалась незмінною. Результати спостереження можна записати в таку таблицю.

$U$ в вольтах	$i$ в амперах	$r$ в омах
$U = 2$	$i_1 = 2$	$r_1 = 1$
$U = 2$	$i_2 = 1$	$r_2 = 2$
$U = 2$	$i_3 = 0.5$	$r_3 = 4$

На нашій таблиці подано результати однієї із спроб: порівнюючи відношення  $i_1:i_2$  і  $i_1:i_3$  з відношеннями  $r_2:r_1$  і  $r_3:r_1$ , ми бачимо, що вони рівні. Звідси висновок: *при одній і тій же напрузі величина струму на ділянці кола обернено пропорційна опорів цієї ділянці.*

Залишаючи без зміни опір ділянки, але міняючи на ній напругу шляхом руху контакту на реостаті або зміною джерел струму, одержимо результати, подібні до занесених у таку таблицю:

$U$ в вольтах	$i$ в амперах	$r$ в омах
$U_1 = 2$	$i_1 = 2$	$r = 1$
$U_2 = 1.5$	$i_2 = 1.49$	$r = 1$
$U_3 = 2.4$	$i_3 = 2.41$	$r = 1$

Порівнюючи відношення  $i_1:i_2:i_3$  з співвідношеннями  $U_1:U_2:U_3$ , знаходимо, що вони рівні. Звідси висновок: *величина струму при одному й тому ж опорі прямо пропорційна напрузі на ньому.*



Ом  $^1$  (1787 — 1854).

<sup>1</sup> Ом Георг народився в Ердангені в Німеччині, був багато років викладачем в гімназії в різних містах, з 1849 року став професором у Мюнхені. Ом установив експериментально й теоретично залежність між величиною струму в колі, електрорушійною силою і опором кола. На основі відкритого ним закону Ом розробив питання про сполучення елементів у батарею, а також дав теорію гальванометра-мультиплікатора.

В області акустики Ом установив, що вухо сприймає як простий тон тільки той звук, який спричинено простим синусоїдальним коливанням.

Об'єднуючи обидва висновки разом, дістаємо закон Ома для дільниці кола.

**Величина струму прямо пропорційна напрузі на від-  
різку провідника і обернено пропорційна його опоріві.**

Якщо в кожній з наведених таблиць поділити числа першого стовпчика, вираженого в вольтах, на числа другого стовпчика, вираженого в амперах, то одержимо числа третього стовпчика, виражені в омах (в межах можливих помилок спостереження).

Звідси закон Ома для дільниці кола можна виразити формулою:

$$\boxed{\frac{U}{I} = R, \text{ або } I = \frac{U}{R}, \text{ або } U = IR.} \quad (\text{VIII})$$

Для всього кола має місце таке ж співвідношення, тільки замість напруги на дільниці  $U$  входить ЕРС джерела, позначу-вана через  $E$ , і замість опору дільниці  $R$  входить повний опір кола, що складається з суми опору зовнішньої дільниці  $r_e$  і внутрішнього опору джерела  $r_i$ .

Формула закону Ома для повного кола:

$$\boxed{I = \frac{E}{R_i + R_e}.} \quad (\text{IX})$$

**Величина струму в колі, виражена в амперах, дорівнює електрорушійній силі джерела у вольтах, поділеній на повний опір кола в омах.**

46. Розподіл напруги по різних дільницях кола. Прилучаючи вольтметр до різних дільниць кола, можна простежити розпо-діл напруги на них. Склавши коло з джерела струму  $AB$ , підвідних проводів і споживача струму  $A_2A_3$  (рис. 46) і замкнувши його, ми можемо виміряти напругу на всій зовнішній дільниці кола, якщо при-лучимо вольтметр до полюсів дже-рела струму  $A$  і  $B$ .

Якщо ми прилучимо один за-тискач вольтметра в точку  $A_1$  (рис. 46), залишивши другий у точці  $B$ , то показ вольтметра зменшиться порівняно з поперед-нім. Тепер його показ дає різ-ницю потенціалів між точками  $A_1$

і  $B$ , тобто роботу по переміщенню одиниці електрики тільки на дільниці  $A_1B$ ; в показ не входить робота на шляху  $AA_1$ .

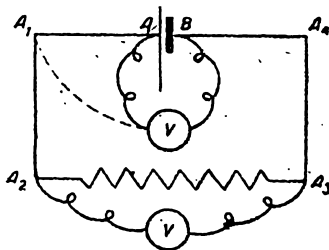


Рис. 46. Вимірювання вольтметром напруги на різних дільницях кола.

Так само поступово зменшуватимуться покази вольтметра, якщо затискач його, прилучений раніше до точки  $A_1$ , послідовно переміщати в точки  $A_2, A_3, \dots$

Через те що з вимкненням кожної нової ділянки  $AA_1, AA_2, \dots$  покази вольтметра зменшуються, то в техніці прийнято говорити, що на ділянках  $AA_1, AA_2, \dots$  і взагалі на першій ділянці відбувається втрата напруги.

Напруга на ділянці називається втраченою напругою тільки з точки зору споживача енергії: напруга на підвідних проводах не може бути використана в приладі, до якого підводиться струм.

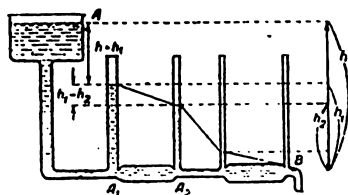


Рис. 47. Зміна напору вздовж витікаючого струменя рідини.

Якщо ми прилучимо один затискач вольтметра до точки  $A_2$ , а другий — до точки  $A_3$ , то ми виміряємо напругу на ділянці  $A_2A_3$ . Взагалі затискачі вольтметра треба прилучити до кінців тієї ділянки, для якої вимірюється напруга.

Ці спостереження підтверджують, що напруга між ділянками кола розподіляється відповідно до опору; формула ж  $U = IR$  показує, що

*напруга на кожній ділянці прямо пропорційна її опорі.*

З формули закону Ома для повного кола маємо:  $E = IR_e + IR_i$

За попереднім  $IR_e$  являє різницю потенціалів на затискачах джерела струму, або інакше напругу на зовнішній частині кола при проходженні по колу струму  $I$  (іноді  $IR_e$  називають ще напругою на затискачах, або спадом напруги у зовнішньому колі; раніше  $IR_e$  називали ще вольтажем, але тепер цей термін не вживається),  $IR_i$  — напруга всередині джерела при проходженні того ж струму.

*ЕРС джерела дорівнює сумі напруг на зовнішній частині кола і всередині джерела при проходженні по колу струму.*

Напруга на затискачах джерела струму, замкненого на зовнішнє коло, завжди менша, ніж ЕРС.

При сталій ЕРС і при сталому внутрішньому опорі джерела струму напруга на затискачах зростає разом із збільшенням опору в зовнішньому колі; але зростання це не безмежне; при нескінченно великому опорі зовнішнього кола (коло розірване) напруга на затискачах дорівнює ЕРС.

Напруга зменшується вздовж кола струму при переході від одного діюса до другого, подібно до того як падає і водяний напір вздовж труби, по якій проходить течія рідини або газу (рис. 47).

Чим більший внутрішній опір, тим більшу частину ЕРС становить напруга всередині джерела ( $U_i$ ) і тим меншу частину у зовнішньому колі ( $U$ ). Тому внутрішній опір джерел струму звичайно роблять як можна меншим.

Справді, якщо, наприклад,  $E = 2$  вольтам,  $R_1 = 0,1$  ома,  $R_e = 1$  омові, то

$$I = \frac{2 \text{ В}}{1,1 \text{ Ом}} = 1,82 \text{ ампера}; U = 1,82 \text{ А} \cdot 1 \text{ Ом} = 1,82 \text{ вольта}; U_1 = 0,18 \text{ вольта}.$$

Якщо ж  $E = 2$  вольтам,  $R_1 = 0,5$  ома,  $R_e = 1$  омові, то

$$I = \frac{2 \text{ В}}{1,5 \text{ Ом}} = 1,33 \text{ ампера}, U = 1,33 \text{ А} \cdot 1 \text{ Ом} = 1,33 \text{ вольта}, U_1 = 0,67 \text{ вольта}.$$

Якщо ж  $E = 2$  вольтам,  $R_1 = 1$  омові,  $R_e = 1$  омові, то

$$I = \frac{2 \text{ В}}{1+1 \text{ Ом}} = 1 \text{ амперу}, U = 1 \text{ вольту}, U_1 = 1 \text{ вольту}.$$

Приклади розрахунків. 1. Який треба вибрати переріз мідного провідника завдовжки 100 м, щоб втрата напруги на ньому була 2,4 вольта при величині струму в 5 амперів?

Втрата напруги, або, що те ж саме, напруга на дільниці  $U = 2,4$  вольта. Опір дільниці:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{2,4 \text{ В}}{5 \text{ А}} = 0,48 \text{ ома}; R = \frac{\rho l}{S}; S = \frac{\rho l}{R}$$

$$S = \frac{0,0175 \cdot 100}{0,48} \text{ мм}^2 = 3,7 \text{ мм}^2.$$

2. Який спад напруги в нікеліновому проводі завдовжки 5 м, з перерізом в 0,4 мм<sup>2</sup> при величині струму 2 ампері?

$$U = IR; R = \frac{\rho l}{S}; U = \frac{I \rho l}{S} = \frac{2 \cdot 0,4 \cdot 5 \text{ В}}{0,4} = 10 \text{ В}; U = 10 \text{ вольтам}.$$

### Вправа 6.

1. Який спад напруги на дільницях, що мають рівні опори?
2. Порівняти напруги на мідній і залізній дретинах рівної довжини і однакового перерізу і ввімкнених послідовно в те саме коло.
3. Чи зміниться показ амперметра, ввімкненого в замкнене коло струму, якщо переставити реостат з одного боку амперметра на другий?
4. Що зміниться на даній дільниці кола, якщо ввімкнений послідовно з нею амперметр покаже збільшення величини струму?
5. Що зміниться на даній дільниці кола, якщо ввімкнений паралельно їй вольтметр покаже зменшення напруги?
6. В замкненій коло ввімкнено реостат і електричний дзвоник. Чи зміниться напруга на затискачах дзвоника, якщо реостат переставити в колі з одного боку дзвоника на другий?
7. Який має бути діаметр манганінової дретини завдовжки 10 м, щоб по ній ішов струм в 0,5 ампера при напрузі на ній в 40 вольтів?

Відп. 0,26 мм.

8. Який буде опір вольфрамового волоска пустотної лампочки, якщо довжина його 456 мм, діаметр 0,021 мм, температура розжарення 2125°, питомий опір (технічний) при 25°  $\rho = 0,053$  і температурний коефіцієнт 0,0051?

Відп.  $\approx 800$  омів.

9. Напруга на затискачах замкненої машини 120 вольтів. Зовнішнє коло складається з реостата опором в 6 омів, дугового ліхтаря, живленого струмом в 10 амперів, і сполучних проводів в 0,5 ома. Знайти опір дугового ліхтаря, напругу на його затискачах і втрату напруги в реостаті та в сполучних про-  
водах.

Відп. 5,5 ома.

10. Яка втрата напруги на провіднику опором у 5 омів при величині струму в 3 ампера?

11. Який опір лампочки з вугільним волоском, якщо вона живиться струмом в 0,5 ампера при напрузі на її затискачах в 120 вольтів?

12. Під якою напругою повинна бути лампочка з опором в 440 омів, якщо вона живиться струмом в 0,25 ампера? Відп. 110 вольтів.

13. Яка величина струму буде в провіднику з опором в 0,4 ома при напрузі на ньому в 2 вольти?

14. Яка величина струму в провіднику з опором в 220 омів при напрузі в 110 вольтів?

15. Навіщо допоміжні частини кола — клемі, замкачі тощо — робляться з коротких товстих мідних частин?

16. Визначити величину струму і напругу на затискачах елемента в колі, яке складається з елемента з ЕРС в 1,5 вольтів і з внутрішнім опором в 0,12 ома і з зовнішнього опором в 1,28 ома. Відп. 1,07 ампер.

17. Щоб узнати внутрішній опір елемента з ЕРС в 2 вольти, його замкнули зовнішнім опором в 1 ом і одержали величину струму в 1,2 ампера. Знайти внутрішній опір елемента. Відп. 0,67 ома.

18. Знайти ЕРС джерела, якщо його внутрішній опір дорівнює 1,6 ома, напруга на затискачах дорівнює 110 вольтам, а зовнішній опір дорівнює 18,3 ома.

19. ЕРС джерела 125 вольтів, внутрішній опір 0,42 ома. В зовнішнє коло вмикають дугову електричну лампу, що потребує для спокійного горіння напруги на затискачах в 45 вольтів і величину струму в 12 амперів. Який треба увімкнути в коло додатковий опір, щоб лампа могла горіти? Якщо реостат зроблено з константану діаметром в 3,6 мм, то яка довжина взяті для нього дротини? Відп.  $\approx 127,1$  м.

20. Яка повинна бути на станції ЕРС джерела струму з внутрішнім опором в 0,5 ома, щоб у будинку, який знаходиться на віддалі 160 м, підтримувалась напруга в 110 вольтів? Величина струму в колі 90 амперів. Проводи мідні з перерізом в 50 мм<sup>2</sup>. Відп. 165 вольтів.

21. Визначити величину струму в колі в задачах 12, 17, 21, якщо станеться коротке замикання, тобто зовнішній опір буде рівним нулеві.

22. Яка буде вигода і чому, якщо замінити один гальванічний елемент таким же типу, але з більшим розміром пластин при тій же зовнішній ділянці кола?

23. Як змінюватиметься напруга на затискачах джерела, якщо поступово вмикати дедалі більший опір з магазину опорів? До якого граничного значення прямуватиме зазначена напруга в цьому випадку?

24. Як змінюватиметься напруга на затискачах і до якого граничного значення вона прямуватиме в міру зменшення опорів зовнішньої частини кола?

25. Яким має бути внутрішній опір амперметра, щоб при вмиканні його в коло напруга на затискачах джерела струму не мінялась?

47. **Послідовне сполучення провідників.** В техніці, та й у лабораторних роботах, ніколи не доводиться складати зовнішню частину кола з самого тільки провідника: звичайно один за одним прилучаються підвідні проводи, рубильники, реостат, гальванометр, прилад споживачі енергії. Сполучення провідників, при якому кінець одного сполучається з початком другого, називається послідовним.

При послідовному сполученні провідників величина струму у всіх провідниках одна і та-ж.

Якщо ділянка кола  $AD$  складається з трьох послідовно увімкнених провідників (рис. 48):  $AB$

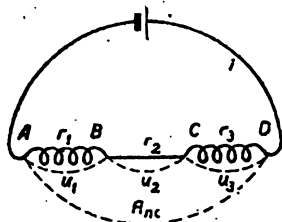


Рис. 48. Послідовне сполучення провідників.

з опором  $r_1$ ,  $BC$  з опором  $r_2$  і  $CD$  з опором  $r_3$ , то величина струму в усіх їх буде одна і та ж  $I$ , а напруга на кожному з них відповідно  $U_1 = Ir_1$ ;  $U_2 = Ir_2$ ;  $U_3 = Ir_3$ . Вимірявши напругу на всьому провіднику  $AD$ , знайдемо, що вона дорівнює сумі напруг на окремих ділянках, тобто  $U = U_1 + U_2 + U_3$ .

Так:

$$\begin{aligned} U_1 &= Ir_1 \\ U_2 &= Ir_2 \\ U_3 &= Ir_3 \\ \hline U &= I(r_1 + r_2 + r_3). \end{aligned}$$

Якщо позначити весь шуканий опір між  $A$  і  $D$  через  $R_{лс}$ , то для нього буде співвідношення:

$$U = IR_{лс}.$$

З порівняння двох останніх рівностей виходить, що

$$\boxed{R_{лс} = r_1 + r_2 + r_3} \quad (X)$$

тобто загальний опір ряду послідовно сполучених провідників дорівнює сумі опорів усіх окремих провідників.

48. Паралельне сполучення провідників. Не завжди можна вводити провідники або прилади в коло послідовно. Наприклад, не можна ввести в освітлювальну сітку послідовно дві лампочки, розраховані на нормальну напругу: вони обидві матимуть неповне розжарення, і при тому не можна буде засвітити або погасити одну, не засвітивши або не погасивши одночасно другої.

Тому в освітлювальній техніці так само, як і в багатьох інших випадках, застосовується сполучення, що називається паралельним..

Сполучення провідників називається паралельним, якщо одні кінці всіх провідників сполучаються в один вузол, другі кінці — в другий; одержане розгалуження вводиться послідовно в нерозгалужену частину кола.

При паралельному сполученні провідників величина струму, що надходить до вузла, дорівнює сумі величин струмів в паралельно сполучених провідниках.

Щоб зрозуміти значення паралельного сполучення провідників, проробимо таку спробу (рис. 49).

Складемо розгалуження з трьох паралельно сполучених віток, увімкнувши в кожну по різній жаровій лампочці і по амперметру.

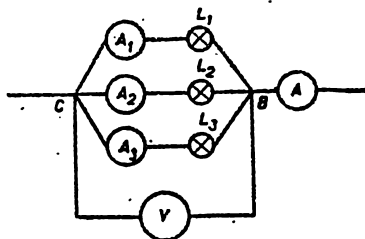


Рис. 49. Паралельне сполучення лампочок.

Вмикаючи першу лампочку  $L_1$ , по амперметру  $A$  відмітимо величину струму в нерозгалуженому колі  $I = 0,70$  ампера і по амперметру  $A_1$  — величину струму в першій вітці  $I_1 = 0,70$  ампера (числа запозичено з однієї спроби). Тепер вмикаємо другу лампочку  $L_2$ . Яскравість першої не змінюється, друга також світить нормально. Величина струму  $I = 1,40$  ампера; величина струму у першій вітці  $I_1 = 0,70$  ампера; в другій  $I_2 = 0,71$  ампера ( $I = I_1 + I_2$ ). Збільшення величини струму в нерозгалуженій частині показує, що прилучення паралельної вітки зменшує загальний опір між точками  $C$  і  $B^1$ . Якщо увімкнути третю лампочку  $L_3$ , то можна бачити, що всі три світить нормально. Величина струму в нерозгалуженій частині  $I = 2,52$  ампера; величина струму у вітках  $I_1 = 0,70$  ампера,  $I_2 = 0,71$  ампера,  $I_3 = 1,1$  ампера ( $I = I_1 + I_2 + I_3$ ).

Нове зростання величини струму в нерозгалуженій частині вказує на пове зменшення опору між точками  $C$  і  $B$ .

Отже, прилучення кожної нової паралельної вітки зменшує загальний опір між кінцями розгалуження, або опір розгалуження із паралельно прилучених провідників менший опору кожної окремої вітки.

Прилучення нової паралельної вітки немов би збільшує переріз провідника, а опір зменшується при збільшенні перерізу.

Знайдемо залежність між опором усього розгалуження  $R_{np}$  і опором окремих паралельно сполучених провідників  $r_1, r_2, r_3$  і т. д.

Під опором розгалуження розуміється опір такого одного провідника, що заміняє розгалуження. При якому напруга на розгалуженні і величина струму в колі лишаються попередніми; отже,  $I = \frac{U}{R_{np}}$ .

Якщо вольтметр показує напругу  $U$  між кінцями розгалуження, то

$$I_1 = \frac{U}{r_1}; I_2 = \frac{U}{r_2}; I_3 = \frac{U}{r_3}; I_1 + I_2 + I_3 = U \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} \right).$$

Якщо порівняти показ амперметра в нерозгалуженій частині з показами амперметрів в окремих вітках, то можна бачити, що для кожної спроби:

$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$

Порівнюючи дві попередні рівності з  $I = \frac{U}{R_{np}}$ , можна написати:

$$\frac{U}{R_{np}} = U \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} \right),$$

звідки, після скорочення на  $U$ :

<sup>1</sup> Опір підвідних проводів дуже малий і може не братися до уваги.

<sup>2</sup> Можна зробити вимірювання, вмикаючи другу й третю лампочки, так: спроба дала для  $I_2 = 0,7$ , для  $I_3 = 1,1$  і для  $I = 1,8$ .

$$\frac{1}{R_{np}} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} \quad (\text{XI})$$

Обернена величина опору, тобто  $\frac{1}{R}$ , називається (§ 42) провідністю провідника. Отже, *провідність розгалуження дорівнює сумі провідностей паралельно сполучених провідників*.  
Обчислення спрощуються, якщо всі вітки мають однаковий опір  $r$ ; тоді при  $n$  вітках:

$$\frac{1}{R} = \overbrace{\frac{1}{r} + \frac{1}{r} + \frac{1}{r} + \dots + \frac{1}{r}}^{n \text{ раз}} = \frac{n}{r},$$

звідки

$$R = \frac{r}{n}. \quad (\text{XII})$$

*Опір розгалуження, що складається з  $n$  однакових віток, в  $n$  раз менший опору однієї вітки.*

49. Розподіл струму між паралельними провідниками. Вимірювання в спробах попереднього параграфу дали:

$$I = I_1 + I_2 + I_3. \quad (\text{XIIIa})$$

**Сума величин струмів у провідниках, сполучених паралельно, дорівнює величині струму в нерозгалуженій частині кола.**

Зрозуміло, що вся та кількість електрики, яка підходить до розгалуження з одного боку, розходитьсь по вітках і потім виходить з другого боку.

Щоб порівняти величини струму в окремих вітках, згадаємо, що

$$U = I_1 r_1 = I_2 r_2 = I_3 r_3. \quad (\text{XIIIб})$$

Сукупність останніх рівностей показує, що:

**Величини струму у провідниках, сполучених паралельно, обернено пропорційні опирам цих провідників<sup>1</sup>.**

<sup>1</sup> З рівності (XIIIб) виходить, що

$$I_1 : I_2 = r_2 : r_1, \text{ або } I_1 : I_2 = \frac{r_2}{r_1 r_2} : \frac{r_1}{r_1 r_2}; \quad I_1 : I_3 = \frac{1}{r_1} : \frac{1}{r_3}.$$

Також

$$I_2 : I_3 = r_3 : r_2, \text{ або } I_2 : I_3 = \frac{1}{r_2} : \frac{1}{r_3}, \text{ звідки } I_1 : I_2 : I_3 = \frac{1}{r_1} : \frac{1}{r_2} : \frac{1}{r_3}.$$



Обидва наведені вище твердження встановлені німецьким фізиком Кірхгофом (1824 — 1887).

Розглянемо кілька прикладів на розрахунки опорів і величин струмів при розгалуженні.

Приклади. 1. Знайдемо опір розгалуження, якщо опори віток:  $r_1 = 2$  оми,  $r_2 = 3$  оми,  $r_3 = 5$  омів. Опір розгалуження позначимо через  $x$ , тоді:

$$\frac{1}{x} = \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{5} \right) \frac{1}{\Omega}; \quad \frac{1}{x} = \frac{31}{30 \Omega}; \quad x = \frac{30}{31} \Omega; \quad x = 0,97 \text{ ома.}$$

2. Який опір треба прилучити до даного опору в 10 омів щоб опір розгалуження дорівнював 2 омам?  $r_1 = 10$  ом;  $R_{\text{вп}} = 2$  ома;  $r_2 = x$ .

$$\frac{1}{2\Omega} = \frac{1}{10\Omega} + \frac{1}{x}; \quad \frac{1}{x} = \frac{1}{2\Omega} - \frac{1}{10\Omega}; \quad \frac{1}{x} = \frac{5-1}{10\Omega}; \quad \frac{1}{x} = \frac{4}{10\Omega}; \quad x = \frac{10\Omega}{4}; \quad x = 2,5 \text{ ома.}$$

3. Величина струму в колі в першій задачі дорівнює 6,2 ампера; знайдемо величину струму в окремих вітках.

За правилом розподілу струму між паралельними провідниками, величина струму в провідниках обернено пропорційна опорам віток, тобто:

$$I_1 : I_2 : I_3 = \frac{1}{r_1} : \frac{1}{r_2} : \frac{1}{r_3} = \frac{1}{2} : \frac{1}{3} : \frac{1}{5} = 15 : 10 : 6;$$

$$I_1 = \frac{I \cdot 15}{15 + 10 + 6}; \quad I_2 = \frac{I \cdot 10}{15 + 10 + 6}; \quad I_3 = \frac{I \cdot 6}{15 + 10 + 6}.$$

Розв'язування зручно розмістити так:

6,2	{	<table style="border-collapse: collapse;"> <tr><td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;"><math>\frac{1}{2}</math></td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;"><math>\frac{15}{30}</math></td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">15</td></tr> <tr><td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;"><math>\frac{1}{3}</math></td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;"><math>\frac{10}{30}</math></td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">10</td></tr> <tr><td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;"><math>\frac{1}{5}</math></td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;"><math>\frac{6}{30}</math></td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">6</td></tr> </table>	$\frac{1}{2}$	$\frac{15}{30}$	15	$\frac{1}{3}$	$\frac{10}{30}$	10	$\frac{1}{5}$	$\frac{6}{30}$	6		$I_1 = \frac{6,2 \text{ A} \cdot 15}{31} = 3 \text{ амперам};$
		$\frac{1}{2}$	$\frac{15}{30}$	15									
		$\frac{1}{3}$	$\frac{10}{30}$	10									
$\frac{1}{5}$	$\frac{6}{30}$	6											
<table style="border-collapse: collapse;"> <tr><td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;"><math>\frac{1}{3}</math></td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;"><math>\frac{10}{30}</math></td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">10</td></tr> </table>	$\frac{1}{3}$	$\frac{10}{30}$	10		$I_2 = \frac{6,2 \text{ A} \cdot 10}{31} = 2 \text{ амперам};$								
$\frac{1}{3}$	$\frac{10}{30}$	10											
<table style="border-collapse: collapse;"> <tr><td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;"><math>\frac{1}{5}</math></td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;"><math>\frac{6}{30}</math></td><td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">6</td></tr> </table>	$\frac{1}{5}$	$\frac{6}{30}$	6		$I_3 = \frac{6,2 \text{ A} \cdot 6}{31} = 1,2 \text{ ампера.}$								
$\frac{1}{5}$	$\frac{6}{30}$	6											
		Сума частин 31.											

**50. Ламповий реостат.** На зменшенні опору розгалуження при вмиканні паралельних додаткових провідників заснована будова лампового реостата.

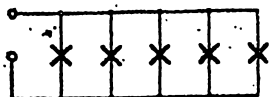


Рис. 50. Схема лампового реостата.

Ламповий реостат являє собою дошку з кількома паралельно ввімкненими цоколями електричних ламп (рис. 50).

Цей реостат вмикається в коло послідовно. Коли ввімкнена одна лампа, опір реостата дорівнює опорі однієї лампи  $r_1$ , коли ввімкнено дві лампи, опір зменшується до  $\frac{r_1}{2}$ , коли ж ввімкнено  $n$  ламп, то опір дорівнює  $\frac{r_1}{n}$ .

На законі розгалуження струмів засновано користування штепсельним реостатом: при вставлених штепселях струм розподіляється між суцільною товстою пластинкою і котушками обернено пропорціонально їх опорам. Через те що опір суцільної штабії близький до нуля, то практично весь струм проходить через неї.

### Вправа 7.

1. В коло, по якому йде струм в 1,4 ампера, ввімкнено паралельно між точками  $A$  і  $B$  три жарові лампи з опорами в 240, 400 і 200 омів. Знайти величину струму в кожній лампі, опір розгалуження і напругу на кінцях його.

*Відп.* 85,7 ома.

2. Розгалуження складається з трьох паралельних провідників в 1 ом, 3 оми і 6 омів. Знайти опір розгалуження і величину струму в кожному провіднику, якщо величина струму до розгалуження дорівнює 2,7 ампера.

*Відп.*  $\frac{2}{3}$  ома.

3. Розгалуження складається з трьох паралельних провідників з опорами в 6 омів, 0,25 ома, 0,4 ома. Знайти опір розгалуження і величину струму в кожному провіднику, якщо величина струму на ділянці до розгалуження дорівнює 3 амперам.

*Відп.* 0,15 ома.

4. Електричний кип'ятильник опором в 4 оми і ламповий реостат з 10 паралельно ввімкнених жарових ламп з опором по 200 омів кожна ввімкнені послідовно з допомогою проводів в освітлювальну сітку під напругою в 120 вольтів. Знайти величину струму, що проходить через кип'ятильник і кожна лампу.

*Відп.* 5 амперів; 0,5 ампера.

5. Як, маючи в своєму розпорядженні реостат з рухомих контактом, зменшити опір ділянки кола між точками  $A$  і  $B$  вдвоє, не замінюючи самого провада  $AB$  іншим?

6. Яка частина повного струму  $I$  пройде по провіднику  $AB$ , якщо паралельно ввімкнути між тими самими точками  $A$  і  $B$  інший провід, опір якого дорівнює  $\frac{1}{9}$  опору першого провідника?

*Відп.* 0,1.

7. Який опір треба ввімкнути паралельно з даним опором  $R$  між тими самими точками  $A$  і  $B$ , щоб по даному опору проходила 0,1 або 0,01, або 0,001 частина того струму  $I$ , який проходить по нерозгалуженій частині кола?

8. Від кінців магістралі, введеної в квартиру, зроблено три відгалуження: в першу вітку ввімкнено паралельно 11 жарових ламп з опором по 220 омів кожна, в другу — 10 ламп з опором по 200 омів і в третю — 7 ламп з опором по 210 омів. Величина струму в магістралі дорівнює 16 амперам. Визначити величину струму в кожній лампі і в кожній вітці. *Відп.* 0,56 А; 0,6 А; 0,57 А.

9. Ламповий реостат влаштовується з жарових ламп, увімкнених паралельно в різній кількості (2; 3; 10 і т. д.). Який найбільший і найменший опір можна скласти з 12 ламп з опором в 240 омів кожна? Скільки треба ввімкнути ламп паралельно, щоб мати опір в 30 омів?

*Відп.* 8 ламп.

10. Чому дорівнюватиме опір розгалуження, якщо паралельно з провідником в 1 ом увімкнути провідник в 1000 омів?

11. Чи зміниться напруга на полюсах джерела, якщо між двома точками кола ввімкнути паралельний опір?

51. Батарея. В тих випадках, коли від окремого елемента одержують у колі недостатній для якоїнебудь потреби струм, можна сполучати разом кілька окремих елементів. Сполучення кількох елементів за певним способом називається батареєю.

Батареї розрізняються способом сполучення між собою окремих елементів.

Сполучення називається послідовним, якщо позитивний полюс одного елемента сполучається з негативним полюсом на-

ступного (рис. 51). Щоб прилучити до такої батареї зовнішнє коло, треба один його кінець сполучити з позитивним полюсом одного крайнього елемента і другий кінець — з негативним полюсом другого крайнього елемента.



Рис. 51. Схема послідовного сполучення елементів у батарею.

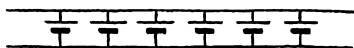


Рис. 52. Схема паралельного сполучення елементів у батарею.

Сполучення називається паралельним, якщо позитивні полюси всіх елементів сполучені між собою, а негативні — між собою (рис. 52). Щоб увімкнути зовнішнє коло, треба один кінець кола прилучити до якогонебудь позитивного полюса, а другий кінець до якогонебудь негативного полюса (або до якихнебудь точок проводів, що сполучають між собою однакові полюси).

Сполучення називається мішаним, якщо всі елементи розбито на групи з однаковим числом елементів; в межах групи елементи сполучені послідовно, а самі групи — паралельно, або навпаки (рис. 53).

**52. Внутрішній опір батареї.** Внутрішній опір батареї при послідовному сполученні однакових елементів буде більший внутрішнього опору окремого елемента в стільки разів, скільки взято елементів.

Внутрішній опір батареї при паралельному сполученні однакових елементів менший внутрішнього опору окремого елемента в стільки разів, скільки взято елементів (§ 48).

При мішаному сполученні розрахунок ведеться так: якщо дано 20 елементів, сполучених у 4 групи по 5 елементів, з внутрішнім опором в 0,8 ома кожний, то опір кожної групи по 5 послідовно сполучених елементів дорівнює  $0,8 \cdot 5 = 4$  омам, опір же чотирьох паралельно сполучених груп буде в 4 рази менший, тобто  $4 : 4 = 1$  ому.

Взагалі, якщо дано  $n$  елементів, сполучених в  $k$  груп по  $m$  елементів у групі ( $n = m \cdot k$ ), при чому групи сполучені паралельно, а елементи у групі — послідовно, і якщо внутрішній опір елемента  $r_i$ , то опір кожної групи дорівнює  $r_i \cdot m$ ; опір батареї дорівнює  $\frac{mr_i}{k}$ .

Знаючи опір батареї, треба тільки знати ЕРС батареї, щоб можна було обчислити величину струму в даному колі, опір зовнішньої частини якого задано.

53. ЕРС батареї. Спроби показують, що ЕРС батареї при послідовному сполученні однакових елементів у стільки разів більша ЕРС елемента, скільки взято елементів.

Дані спроби можна пояснити таким міркуванням.

Якщо позначимо потенціал негативного полюса першого елемента зліва через  $U$  (рис. 51), то потенціал позитивного полюса його виразиться через  $U + E$ , де  $E$  — ЕРС його. Негативний полюс другого елемента, сполученій з позитивним полюсом першого, має однаковий з ним потенціал, тобто  $U + E$ .

Але позитивний полюс другого елемента вищий потенціала його негативного полюса ще на величину  $E$  і дорівнює  $U + 2E$ . Такий самий потенціал негативного полюса третього, сполученого з позитивним другого. Дальше зростання потенціала іде за тим же законом досягаючи на позитивному полюсі другого крайнього елемента величини  $U + nE$ ; ЕРС батареї дорівнюватиме

$$(U + nE) - U = nE.$$

При паралельному сполученні ЕРС батареї однакова з ЕРС окремого елемента.

В цьому випадку позитивні полюси всіх елементів сполучаються між собою, всі негативні полюси — між собою (рис. 52). Батарея уподібнюється одному елементові, пластинки якого мають більший розмір, ніж у окремого елемента, а ЕРС елемента не залежить від його розміру.

При мішаному сполученні ЕРС батареї визначається двома попередніми правилами: вона дорівнює ЕРС одного елемента, помноженій на число елементів, послідовно сполучених у кожній групі; число ж груп, сполучених паралельно, не впливає на величину ЕРС.

54. Найвигідніше сполучення елементів у батарею. Встановивши формули ЕРС і опору батареї, можна розрахувати величину струму в колі при одному елементі і при різних способах сполучення їх у батарею.

Величина струму в колі з одного елемента:  $i = \frac{E}{r_i + r_e}$ .

При послідовному сполученні в батарею величина струму:

$$I_{nc} = \frac{nE}{nr_i + r_e}$$

При паралельному сполученні в батарею величина струму

$$I_{np} = \frac{E}{\frac{r_i}{n} + r_e}$$

Якщо внутрішній опір батареї дуже малий порівняно з опором зовнішнього кола, тобто якщо величиною  $nr_i$  можна знехтувати порівняно з  $r_e$ , то

$$i = \frac{E}{r_e}; I_{nc} = \frac{nE}{r_e}; I_{np} = \frac{E}{r_e}$$

З порівняння цих виразів для величини струму в колі від одного елемента і від батареї можна зробити висновок: якщо внутрішній опір батареї малий порівняно з опором зовнішнього кола, то послідовне сполучення елементів у батарею дає величину струму в стільки разів більшу (порівняно з величиною струму в колі з таким самим зовнішнім опором, але від одного елемента), скільки взято елементів; батарея ж паралельно сполучених елементів дає в цьому випадку таку ж величину струму, як і один елемент.

Якщо ж опір зовнішньої ділянки дуже малий порівняно з внутрішнім опором елемента, тобто  $r_e$  може бути прийнятий за нуль, то

$$i = \frac{E}{r_1}; I_{nc} = \frac{E}{r_1}; I_{np} = \frac{nE}{r_1}.$$

Висновок: якщо внутрішній опір елемента великий порівняно з опором зовнішньої ділянки, то при  $r_e$ , близькому до нуля, паралельне сполучення елементів у батарею дає величину струму в стільки разів більшу, ніж величина струму в такому ж колі від одного елемента, скільки взято елементів; батарея ж елементів, сполучених послідовно, дає таку саму величину струму, як і один елемент.

Тількищо пророблене обчислення показує, що *послідовне сполучення елементів вигідніше<sup>1</sup>, коли зовнішній опір великий порівняно з внутрішнім. Паралельне — тоді, коли він малий.*

Для мішаного сполучення із  $k$  груп по  $m$  елементів, сполучених послідовно в кожній групі, величина струму виражається формулою

$$I_{см} = \frac{mE}{\frac{mr_1}{k} + r_e}.$$

Обчислення показує, що з найможливіших групувань елементів найбільшу величину струму дає те, при якому зовнішній опір дорівнює внутрішньому опорів батареї, тобто

$$\frac{mr_1}{k} = r_e.$$

**55. Визначення опору містком Уітстона.** На законі розгалуження струму заснований один із самих точних способів вимірювання опору. Презначена для цього установка називається містком Уітстона.

Прилад, що називається реохордом, складається з метрової лінійки (рис. 54), на якій натягнута тонка однорідна дротина з нікеліну або іншого стопу, що має великий питомий опір. Між кінцями дротини  $A$  і  $B$  ввімкнені сполучені послідовно: відомий опір  $r$  (між  $A$  і  $C$ ) і вимірюваний опір  $r_x$  (між  $B$  і  $C$ ). Точка спо-

<sup>1</sup> Вигідніше — це значить: дає величину струму значно більшу, ніж величина струму від одного елемента.

дучення обох опорів  $C$  сполучена з одним затискачем амперметра, градуйованого на міліампери (міліампер = 0,001 А); другий затискач його гнучкою дротинкою прилучають до повзунок  $D$ , що ковзає уздовж однорідної дротини. Ця частина прилада  $CD$  схожа на міст, перекинутий між двома вітками прилада, і дає назву всьому приладові.

До кінців  $A$  і  $B$  реохорда прилучений паралельно йому елемент  $E$ .

Якщо замкнути коло, струм розгалужується по вітках  $BCA$  і  $BDA$ ; струм пройде також по мосту  $CD$  і дасть відхилення стрілки міліамперметра.

Пересуваючи повзунок  $D$  і тим міняючи опори частин  $r_1$  і  $r_2$ , можна домогтися такого стану, що струм через міст не пройде.

Відсутність струму через міліамперметр показує, що точки  $C$  і  $D$  знаходяться при однакових потенціалах.

Позначимо однакові потенціали точок  $C$  і  $D$  через  $U$ , потенціал точки  $B$  через  $U_1$  і потенціал точки  $A$  через  $U_2$ ; величина струму у вітці  $BCA$  —  $i_1$ ; в вітці  $BDA$  —  $i_2$ .

Тоді на підставі закону Ома для ділянки кола:

$$\begin{aligned} U_1 - U &= i_1 r_x; & U - U_2 &= i_1 r; \\ U_1 - U &= i_2 r_1; & U - U_2 &= i_2 r_2. \end{aligned}$$

Звідси:

$$i_1 r_x = i_2 r_1; \quad i_1 r = i_2 r_2.$$

Ділимо почленно першу рівність на другу:

$$r_x : r = r_1 : r_2.$$

Отже, при відсутності струму через міст опори чотирьох віток пропорціональні.

Але через те що дротина, натягнута на лінійку, однорідна, то опори її частин пропорціональні довжинам:

$$r_1 : r_2 = l_1 : l_2$$

$$r_x : r = l_1 : l_2.$$

З цього виводу випливає спосіб користування приладом. Ввімкнувши вимірюваний і відомий опір так, як показано на рисунку, пересувають повзунок доти, поки не зникне струм у містку. Потім вимірюють довжини  $l_1$  і  $l_2$  і обчислюють невідомий опір за формулою:

$$r_x = \frac{r l_1}{l_2}.$$

Зробіть на лабораторній роботі вимірювання якогонебудь невідомого опору.

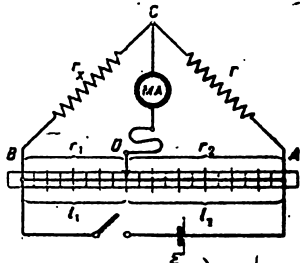


Рис. 54: Місток Уїтстона.

## Вправа 8.

1. 10 акумуляторів з  $EPC = 2$  вольтам і  $r_1 = 0,08$  ома сполучені послідовно і замкнені колом з  $r_e = 3,2$  ома. Знайти величину струму в колі від батареї, величину струму в колі від одного елемента при тих самих даних і величину струму в обох випадках при короткому замиканні ( $r_e = 0$ ).

*Відп.* 5; 0,61; 25 і 25 амперів.

2. Два однакових елементи сполучені паралельно. Чому дорівнюватимуть  $EPC$  і внутрішній опір такої пари елементів? Розв'язати ті ж питання для випадку подібного сполучення  $n$  однакових елементів.

3. Два елементи, що мають кожний  $EPC$  в 2,5 вольтів і внутрішній опір в 1 ом, сполучені разом паралельно; потім спільний позитивний і спільний негативний полюси сполучені провідником з опором в 0,5 ома (або 5 омів). Знайти величину струму у колі і порівняти її з тією величиною, яку ми мали б, якби той самий зовнішній провідник замикав один елемент.

4. 10 елементів з  $EPC = 2$  вольтам і з  $r_1 = 1$  ому сполучені паралельно і замкнуті провідником з  $r_e = 0,1$  ома. Знайти величину струму від батареї, величину струму в колі від одного елемента при тих самих даних, величину струму в обох випадках при короткому замиканні і при  $r_e = 3,2$  ома.

*Відп.* 10; 1,8; 20 і 2; 0,6 і 0,5 ампера.

5. 10 елементів з  $EPC = 1,5$  вольтів поділено на дві групи по 5 послідовно сполучених елементів в кожній групі, групи ж сполучені паралельно;  $r_1 = 0,8$  ома. Знайти величину струму від батареї і від одного елемента, якщо зовнішній опір  $r_e = 20$  омів або 2 омів, або 0,2 ома.

*Відп.* Для батареї 0,34; 1,875; 3,4 ампера.

6. Дано 12 елементів з  $EPC = 2$  вольтам, з  $r_1 = 1$  ому і  $r_e = 0,75$  ома. Обчислити величину струму при всяких сполученнях елементів (послідовному, паралельному і будь-якому групуовому) і вказати найвигідніше сполучення.

*Відп.* 4 паралельні групи по 3.

## ЗАПИТАННЯ.

1. Яку властивість має відношення  $\frac{U}{I}$  для однієї й тієї ж ділянки кола при зміні  $U$  і  $I$ ?

2. Яку властивість провідника характеризує відношення  $\frac{U}{I}$ ?

3. Як вибрана і як називається одиниця опору?

4. Як виражається і яка формула закону Ома для ділянки кола?

5. Який закон опору провідника?

6. Що називається питомим опором речовини?

7. Яка формула опору?

8. Що називається електрорушійною силою джерела струму?

9. Як виражається і яка формула закону Ома для повного кола?

10. Як називається різниця між  $EPC$  і напругою на затискачах джерела струму при замкненому зовнішньому колі, на що вона йде і від чого залежить її величина?

11. Що називається послідовним сполученням провідників і як обчислюється в цьому разі загальний опір кількох провідників?

12. Що називається паралельним сполученням провідників?

13. Що називається провідністю провідника?

14. Який закон провідності розгалуження, що складається з кількох різних провідників?

15. Чому дорівнює опір розгалуження, яке складається з кількох однакових провідників?

16. Яке співвідношення між величиною струму в головному колі і величинами струмів в окремих вітках?

17. Яка залежність між величинами струмів і опорами віток?

18. Чому в магазині опору при вставлених штепселях струм не проходить (практично) через котушки опору?

19. Що називається батареєю елементів? Якє сполучення елементів називається послідовним, паралельним і мішаним?

20. Яка формула для величини струму батареї при послідовному сполученні? При якому співвідношенні між зовнішнім і внутрішнім опором батареї послідовне сполучення вигідніше порівняно з одним елементом?

21. Яка формула величини струму батареї при паралельному сполученні? Умова вигідності цього сполучення?

22. Яка формула величини струму батареї при мішаному сполученні? Умова вигідності цього сполучення?

56. Енергія і потужність струму. Вище (§ 36) було сказано, що в усьому колі електричного струму через поперечний переріз провідника проходить однакова кількість електрики  $Q$  і на кожній ділянці кола існує особлива напруга, або різниця потенціалів.

У першому розділі було показано, що переміщення  $Q$  одиниць електрики від точки з потенціалом  $U_1$  в точку з потенціалом  $U_2$  відбувається з затратою енергії  $A = Q(U_1 - U_2)$ .

Якщо цю різницю потенціалів (напругу) позначити буквою  $U$ , а енергію, віддану електричним струмом, буквою  $W$ , то ця енергія для першої-ліпшої ділянки виразиться формулою:

$$W = QU; \quad (\text{XIVa})$$

для всього кола:

$$W = QE^1.$$

Через те що  $Q = It$ , то енергія, віддавана електричним струмом на ділянці:

$$W = IUt,$$

в усьому колі:

$$W = IEt. \quad (\text{XIVb})$$

Якщо  $I$  виміряно в амперах,  $U$  — у вольтах,  $t$  — в секундах, то  $It$  виражається в кулонах, а  $W$  — в джоулях (на підставі виводів § 13).

Отже, ми бачимо, що назва одиниці енергії — джоуль — може бути замінена найменуванням кулон-вольт:

$$\text{джоуль} = \text{кулон} \times \text{вольт}.$$

Потужність струму на будь-якій ділянці кола вимірюється кількістю енергії, відданою електричним струмом за одну секунду. Потужність

$$N = \frac{W}{t}.$$

Поділивши обидві частини рівності  $W = IUt$  на  $t$ , матимемо:

$$N = IU. \quad (\text{XV})$$

<sup>1</sup> При умові, що немає додаткових зворотних ЕРС, наприклад, ЕРС поляризації (§ 91) або індукції (§ 1.4).



В тій же системі одиницею потужності є ват. З формули видно, що *потужність струму дорівнює ватові, якщо по провіднику проходить струм в 1 ампер при напрузі на провіднику в 1 вольт:*

$$\text{ват} = \text{вольт} \times \text{ампер}.$$

З курсу механіки відомо, що джоуль інакше називається ват-секунда, що 3600 джоулів мають назву ват-година, 360 000 джоулів називаються гектоват-година і 3 600 000 — кіловат-година.

57. Перетворення електричної енергії в теплову. Всі спроби показують, що проходження електричного струму спричиняє нагрівання всіх дільниць провідників, які входять у коло.

Отже, в колі ми маємо такі перетворення енергії. В генераторі хімічна (або механічна, якщо генератором струму є електрична машина) енергія перетворюється в електричну енергію струму електронів або іонів; в колі ж електрична енергія перетворюється в теплову та в інші форми енергії (наприклад, хімічну або енергію індукційного струму).

Якщо на дільниці кола немає перетворення електричної енергії в інші форми енергії, то електрична енергія на цій дільниці цілком перетворюється в теплову; в інших випадках відбувається тільки часткове перетворення електричної енергії в теплову.

Електричний струм завжди супроводиться виникненням теплової енергії в провідниках, по яких він проходить.

Вивчити залежність між кількістю теплоти, яка виникає в колі, і електричними величинами, що характеризують коло, можна самостійно на такій лабораторній роботі.

58. *Лабораторна робота 1.* Виведення із спроби закону теплової дії струму.

Прилади: 1) 3 акумулятори; 2) калориметр; 3) термометр; 4) амперметр; 5) спіраль опору в 1 і 2 оми; 6) мензурка; 7) вага і важки; 8) рубильник; 9) гас; 10) реостат з рухомих контактом.

Вимірювати треба, з одного боку, величину струму, що проходить по дільниці з вимірним заздалегідь опором, з другого боку — кількість теплоти, яка виділяється на цій дільниці. Само собою зрозуміло, що для вимірювання кількості теплоти треба досліджуваний провідник вмістити в калориметр. Цим вважається вся установка спроби.

**Завдання 1.** Знайти залежність між кількістю виділеної теплоти і часом проходження струму.

Хід роботи. 1. Знайдіть зважуванням масу калориметра в грамах.

2. Влійте в калориметр таку кількість гасу, щоб рідина вкривала всю спіраль і щоб стовпчик опущеного в рідину термометра було видно над калориметром. Знайдіть зважуванням або мензуркою масу взятого гасу  $m_1$  грамів.

3. Опустіть у калориметр спіраль і термометр.

4. Складіть коло: 1 — 2 акумулятори, рубильник, спіраль опору, амперметр.

5. Запишіть початкову температуру гасу  $t^0 = \dots$

6. Запам'ятайте час, закрийте струм, запишіть величину струму  $I$  амперів, мішайте мішалкою рідину; через  $T_1 = 5$  хвилинам від початку спроби запишіть температуру гасу:  $t_1 = \dots$  і через  $T_2 = 10$  хвилинам від початку спроби знову запишіть температуру:  $t_2 = \dots$  Розімкніть коло.

7. Якою формулою виразиться кількість теплоти  $q_1$  калорій, одержана калориметром за час  $T_1 = 5$  хвилинам? Якою формулою виразиться кількість  $q_2$

калорій, одержана калориметром за час  $T_2=10$  хвилинам? Як відноситься  $q_2$  до  $q_1$  (показати, що  $\frac{q_2}{q_1} = \frac{t_2 - t}{t_1 - t}$ )?

8. Як відносяться два відрізки часу  $T_2$  і  $T_1$ ? Яке співвідношення між  $\frac{q_2}{q_1}$  і  $\frac{T_2}{T_1}$ ? Який висновок із спроби?

9. Запишіть одержані числа в таблицю.  
Прилад № ...; опір  $R_1 = \dots$  омів; величина струму  $I = \dots$  амперів; маса калориметра  $m = \dots$  грамів; маса газу  $m_1 = \dots$  грамів.

Номер	Час	Температура	Відношення відрізків часу і відношення кількостей теплоти	Різниця $\frac{T_2}{T_1} - \frac{q_2}{q_1}$	Різниця, виражена в % відносно $\frac{T_2}{T_1}$
	0 сек. $T_1 = \dots$ $T_2 = \dots$	$t^\circ = \dots$ $t_1^\circ = \dots$ $t_2^\circ = \dots$	$\frac{T_2}{T_1} = \dots$ $\frac{q_2}{q_1} = \frac{t_2 - t}{t_1 - t} = \dots$		

**Завдання 2.** Знайти залежність між кількістю виділеної теплоти і величиною струму.

**Завдання 3.** Знайти залежність між кількістю виділеної теплоти і опором провідника.

План і хід виконання другого і третього завдань складіть самостійно.

**59. Закон Джоуля-Ленца** для теплової дії струму. Дослідження теплової дії струму проробив англійський учений Джоуль в 1840 р. Приладом для цього дослідження служив калориметр, в рідину якого опускалась дротина у вигляді спіралі (рис. 55).

Якщо ввімкнути в коло джерело струму, амперметр і дротину спіралі, опущену в калориметр, то амперметром можна виміряти величину струму, що проходить по провіднику. З другого боку, за калориметричною формулою можна обчислити кількість теплоти, що утворюється в калориметрі. Міняючи в різних спробах час проходження струму, опір провідника і величину струму, що по ньому проходить, можна вивести залежність між усіма цими величинами і кількістю теплоти. З своїх дослідів Джоуль і незалежно від нього Ленц<sup>2</sup> встановили такий закон, відомий під назвою закону Джоуля-Ленца:

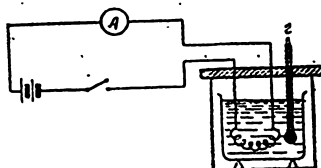


Рис. 55. Прилад для дослідів Джоуля.

<sup>1</sup> Якщо робота відбувається фронтально на кілька груп, то треба знайти також середнє значення для всіх груп.

<sup>2</sup> Ленц (1804 — 1865) — російський академік.

**Кількість теплоти, виділюваної в провіднику струмом, прямо пропорційна квадратові величини струму, опорів провідника і часові проходження струму.**

Якщо енергія електричного струму на якійсьбудь ділянці цілком перетворюється в теплову, то закон Джоулі-Ленца можна вивести з установлених раніше співвідношень.

Справді, для кожної ділянки електрична енергія:

$$W = IUt \text{ і } U = IR, \text{ звідки } W = I^2Rt.$$

В цій формулі енергія виражена в джоулях.

Запозичуючи з другої частини (§ 42) підручника значення термічного еквівалента роботи, рівного 0,24 (кал/джоуль), можна виразити енергію струму в тепловій формі:

$$Q_m = 0,24 I^2Rt.$$

Отже, для обчислення енергії або потужності електричного струму можна користуватися будь-яким з поданих нижче виразів (середні формули стосуються тільки тієї частини електричної енергії, яка на розгляданій ділянці кола перетворюється цілком у теплову).

Енергія струму

Потужність

в механічних  
одиначках

в теплових  
одиначках

$$\begin{aligned} W &= IUt \\ W &= I^2Rt \\ W &= \frac{U^2}{R} \cdot t \end{aligned}$$

(XVI)

$$\begin{aligned} Q &= 0,24 IUt \\ Q &= 0,24 I^2Rt \\ Q &= 0,24 \frac{U^2}{R} \cdot t \end{aligned}$$

(XVII)

$$\begin{aligned} N &= IU \\ N &= I^2R \\ N &= \frac{U^2}{R} \end{aligned}$$

(XVIII)

Множник 0,24 є термічним еквівалентом відповідної електричної енергії, обчисленої з допомогою електричних величин  $I$  і  $R$  і вираженої в джоулях.

Цей еквівалент можна визначити самостійно на лабораторній роботі.

**60. Лабораторна робота 2. Визначення теплового еквівалента електричної енергії.**

Прилади: 1) калориметр; 2) термометр; 3) спіраль<sup>1</sup> з опором в 2—3 оми; 4) амперметр; 5) вольтметр; 6) 2 акумулятори; 7) рубильник; 8) вага і важки; 9) годинник; 10) гас.

Хід роботи. 1. Сполучіть позитивний полюс одного акумулятора з негативним другого і до вільних полюсів прилучіть зовнішнє коло, що складається з дротяної спіралі, амперметра і рубильника. До кінців дротяної спіралі прилучіть паралельно їй вольтметр (рис. 55).

2. Знайдіть масу калориметра  $M$  грамів.

<sup>1</sup> Замість спіралі, можна взяти електричну лампочку і ввікнути її в освітлювальну сітку. Тоді вольтметр треба взяти з шкалою близько 120 вольтів.

3. Налийте в калориметр стільки гасу, щоб він цілком міг покрити дріт'яну спіраль, опущену в калориметр, і знайдіть масу гасу  $m$  грамів.

4. Опустіть спіраль у калориметр, вставте в нього термометр і запам'ятайте початкову температуру  $t_1^\circ$ .

5. Замкніть струм, запам'ятавши час замикання. Запишіть величину струму і напругу на спіралі.

6. Після того як температура гасу підніметься градусів на 5, розімкніть струм і запишіть час пропускання струму  $T$  секунд і кінцеву (найвищу) температуру  $t_2^\circ$ .

7. Запишіть числа в таблицю:

№ вимірювання	Маса $M$ калориметра	Маса $m$ гасу	Початкова температура $t_1^\circ$	Кінцева температура $t_2^\circ$	Величина струму $I$	Напруга $U$	Час $T$

8. Обчисліть кількість теплоти  $Q$  калорій, набуту гасом і калориметром при нагріванні від  $t_1$  до  $t_2$ .

9. Обчисліть роботу струму  $W$  джоулів у спіралі за час  $T$  секунд при величині струму  $I$  амперів і напрузі  $U$  вольтів.

10. Знайдіть відношення  $\frac{Q}{W}$  кал джоуль.

11. Повторіть вимірювання кілька разів для різних відрізків часу, величин струмів і напруг і знайдіть середнє значення  $\frac{Q}{W}$ .

12. Порівняйте це середнє значення з табличним значенням 0,24 і виразіть у процентах припущену похибку.

13. Якщо працювало кілька груп, треба знайти середнє значення за даними всіх їх.

#### Вправа 9.

1. Визначте кількість теплоти, яка виділяється протягом години в жаровій лампочці, що споживає 0,5 ампера, при напрузі 110 вольтів.

2. Яка величина струму потрібна для нагрівання протягом 10 хвилин 500 см<sup>3</sup> води від 16° до 100° з допомогою опущеної у воду спіралі з опором у 6 омів, якщо втрата на випромінювання становить 20%? *Відп. 47 520 кал.*

3. На затискачах дуги зварної машини Крємера напруга дається в 60 вольтів; величина струму, що проходить, дорівнює 150 амперам. Знайти опір дуги і потужність струму. *Відп. 0,4 ома; 9 квт.*

4. Діаметр вугільного електрода для зварювання способом Бєрнардоса дорівнює 30 мм, довжина дорівнює 300 мм. Знайти опір і витрату енергії за секунду на вугіллі, якщо величина струму дорівнює 800 амперам ( $\rho = 40$ ). *Відп. 0,017 ома.*

5. Переріз мідних проводів, що підводять струм в електротопній печі системи Фіат, дорівнює 4800 мм<sup>2</sup>. Загальна довжина їх дорівнює 13,5 м. Знайти їх опір. Яка потужність у них витрачається при величині струму в 8000 амперів?

6. Знайти коефіцієнт корисної дії кип'ятильника ємністю в 2,5 л, якщо вода, налита в нього при 12°, закипить через 15 хвилин при величині струму в 10 амперів і напрузі в 120 вольтів. Скільки коштує кип'ятіння при ціні 2 коп. за 1 гвт - год?

Відп. 85%; 6 коп.

7. В коло ввімкнені послідовно мідна, залізна і нікелінова дротини рівної довжини й діаметра. В якій із дротини виділиться найбільша кількість теплоти? Яка з двох перших дротин нагріється на більше число градусів (питома вага міді —  $8,9 \frac{2}{\text{см}^3}$ , заліза  $7,8 \frac{2}{\text{см}^3}$ , питома теплоємність міді 0,09, заліза 0,11)?

8. Зовнішнє коло складається з 2 м мідного дроту. Чи змінюватиметься нагрівання однієї половини його, якщо сильно охолодити другу?

9. Чому дорівнює коефіцієнт корисної дії мотора в 10 КС, якщо він бере струм у 80 амперів при напрузі в 110 вольтів?

10. Електричний кип'ятильник з опором в 4 омні і ламповий реостат з 10 паралельно ввімкнених жарових ламп з опором по 200 омів кожна увімкнені послідовно проводами в освітлювальну сітку під напругою в 120 вольтів. Через який час можна нагріти 200 см<sup>3</sup> води від 0 до 100°, якщо коефіцієнт корисної дії кип'ятильника дорівнює 75%?

11. В коло ввімкнені паралельно мідна й залізна дротини рівної довжини і перерізу. В якій з дротини виділиться більша кількість теплоти за один і той же час?

12. Електрична каструля бере 6 амперів при 110 вольтах. Скільки кіньських сил тратиться в приладі?

Відп. 0,9 КС.

61. Теплові ампер-вольтметри. На тепловій дії струму заснована будова приладів для вимірювання величини струму і напруги. Істотну частину теплових приладів становить платино-срібна дротина, закріплена на кінцях у точках А і В (рис: 56).

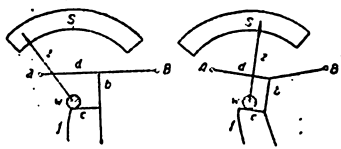


Рис. 56. Схема теплового амперметра.

При пропусканні через неї струму вона нагрівається і здовжується; середина її відтягується з допомогою латунної дротинки *b*, на середину якої діє пружина *f*. Ці переміщення дротин приводять в обертання зв'язане з ними коліщатко *w*; в результаті цього обертання стрілка-показчик *z* переміщується по шкалі *S*.

Тепловий вольтметр відрізняється від амперметра того ж типу лише тим, що послідовно з дротиною в ньому має бути ввімкнений додатковий опір, який знаходиться звичайно всередині самого прилада.

62. Термоелектрика. Перехід теплової енергії в електричну

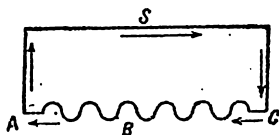


Рис. 57а. Схема термоелемента.

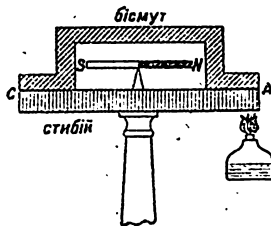


Рис. 57б. Термоелемент.

був відкритий Зеєбеком в 1823 р. Якщо спаяти кінцями два провідники з різних металів (рис. 57а і 57б) і один спай підтриму-

вати при більш високій температурі, а другий — при нижчій, то по металах проходить електричний струм, отже, між обома спаями виникає ЕРС.

Електричний струм, одержаний за рахунок різного нагрівання спаїв двох провідників з різних металів, називається термоелектричним струмом. Термоелектрична ЕРС для всіх пар металів дуже мала. Одна з найбільших ЕРС для пари бісмут — стибій дорівнює 0,011 вольта при температурі спаїв  $0^{\circ}$  і  $100^{\circ}$ ; в цій парі струм іде через нагрітий спай від бісмуту до стибію.

Коефіцієнт корисної дії термоелементів і термобатареї настільки низький (1 — 3%), що вони не набули технічного значення як джерела струму. Але термоелементи застосовуються при конструюванні дуже чутливих приладів, що вимірюють величину струму, і для будування термоелектричних термометрів.

**63. Термоелектричний термометр.** Термоелектричний термометр для вимірювання високих температур складається з двох д्रोцинок різнорідних туготопких металів, спаяних з одного боку між собою і вставлених в довгу фарфорову трубку (рис. 58);



Рис. 58. Термоелектричний термометр.

вільні кінці обох д्रोцинок сполучаються з дуже чутливим гальванометром. Коли фарфорова трубка поміщається в піч спаяними кінцями д्रोцинок, то цей спай нагрівається, в той час як два інших кінці знаходяться при кімнатній температурі. Від різниці температур спаїв виникає струм, який і виявляється гальванометром. Гальванометр попередньо градується на градуси температури.

Таким чином за показом гальванометра можна визначити різницю температур нагрітого спаю (печі) і температури кімнати. Прилад називається термоелектричним пірометром.

Такий термометр, заснований на явищі термоелектрики, тільки трохи іншої будови, застосовується для вимірювання малих температур.

**64. Вольтова дуга.** Техніка використання теплових дій струму іде двома основними лініями: техніка нагрівання і техніка освітлення. До них можна приєднати ще будування приладів для вимірювання температур.

Електричне освітлення здійснюється в трьох формах: розжарювання провідника у відсутності кисню, одержання полум'я у повітрі і свічення розрідженого газу (§ 105).

Будова жарових лампочок відома з попереднього курсу.

На тепловій дії струму засноване і інше потужне джерело світла і тепла — вольтова дуга (полум'я в повітрі). Вольтова дуга, одержана в 1803 р. російським ученим Петровим, за-

госювана була в 1876 р. російським електротехніком Яблочковим для освітлення.

Щоб одержати дугу, треба прилучити проводи до двох вуглин  $\gamma$ , привести їх в стикання і пропустити через вуглини струм в 10—12 амперів при напрузі в 40—75 вольтів. На кінцях вуглин в наслідок поганого стикання виходить найбільший опір. Отже, на кінцях вуглини буде найбільше виділення тепла і нагрівання до високої температури. Від цього нагрівання навколишнє повітря стає провідником (причина провідності вивчається в § 100). Якщо тепер трохи розсунути вуглини одну від одної, то струм не припиняється і при розсунутих вуглинах.



Рис. 59. Вольтова дуга.

Розвиток тепла стає настільки великим, що гази розжарюються і між кінцями вуглини утворюється вигнута догори (при горизонтальному положенні вуглин) дуга з розжарених газів, в якій носяться і розжарені частинки вугілля — це і є вольтова дуга (рис. 59). Дослідження дуги показали:

1. Позитивна вуглинка при постійному струмі згорає швидше, ніж негативна, через що її треба робити товщою.

2. На позитивній вуглині згорання йде нерівномірно в різних точках: середина згорає швидше, через що на ній утворюється заглибина, що називається кратером; негативна вуглинка, навпаки, при згоранні на кінці загострюється.

3. Температура кратера звичайної вольтової дуги з вугільними електродами в повітрі — близько  $4000^{\circ}$ , негативної вуглини — близько  $3000^{\circ}$ . Відповідно до цього кратер випромінює 85%, негативна вуглинка 10%, сама дуга 5% усього світла. Витрата енергії у вольтовій дузі — до 0,6 вата на свічку (§ 158).

4. Якщо пропускати змінний струм через вуглини, то згорання їх відбувається рівномірно.

5. Якщо всередину вуглин вставляти стрижні з пресованих солей барію, стронцію, кальцію, то довжина дуги при тій же напрузі зростає, світла виходить більше (витрата 0,3 вата на свічку), виникає кольорове забарвлення; такі вуглини дістали назву ефектних.

Щоб дуга не переривалась, необхідно поступово зближати вуглини в міру згорання. У ліхтарях для освітлення зближення виконується автоматичним регулятором, сполученим з дугою; в проєкційних ліхтарях — ручним регулятором (рис. 60).

Вольтова дуга, утворена в особливих умовах, дала можли-

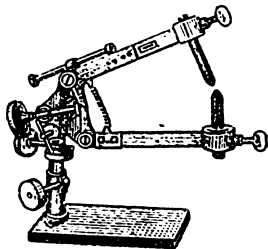


Рис. 60. Ручний регулятор вольтової дуги.

<sup>1</sup> Дугу можна мати й без вуглин між кінцями проводів.

вість досягти дуже високої температури. В 1915 р. Луммеру вдалось утворити дугу у водневому середовищі під тиском в 22 атмосфери. Тоді яскравість дуги збільшилась у 18 раз порівняно з нормальною, а температура досягла (за обчисленням) 7500°. При цих умовах вугілля, завдяки високому тиску, топилося, а не переходило відразу у пароподібний стан, як при нормальному тиску.

**65. Електричні печі.** Друга галузь застосування теплової дії електричного струму — техніка нагрівання.

Не спиняючись на електричних нагрівних приладах домашнього вжитку, звернемося до електричних нагрівних установок виробничого характеру.

Електричні печі будуються трьох видів: печі опору, печі дугові і індукційні. Перші використовують тепло, що утворюється в провідниках за законом Джоуля - Ленца. Другі використовують тепло, що його дає вольтова дуга. Принцип дії індукційних печей буде з'ясовано нижче.

Електричні печі застосовуються для нагрівання оброблюваних предметів і топлення.

У металопромисловості вони застосовуються для загартовування сталі, цементування, на монетних дворах — для топлення металів, в керамічній і скляній промисловості — для емалювання, випалювання виробів, топлення скла.

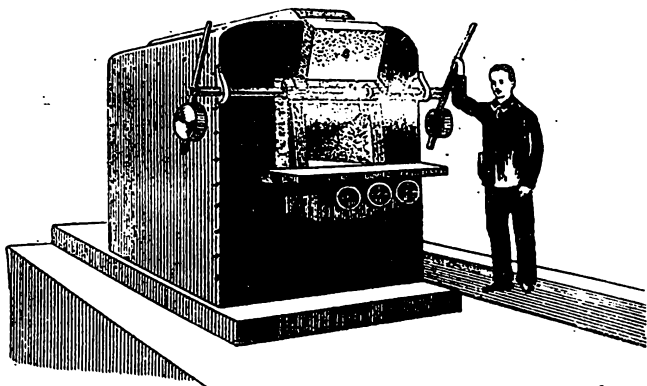


Рис. 61. Зовнішній вигляд електричної печі.

Печі для нагрівання містять ряд вертикальних стрижнів з півпровідників, укладених у глибокі западини і нагріваних електричним струмом. Такий стан забезпечує вільне випромінювання тепла у внутрішній робочий простір печі. Зовнішній вигляд печі дано на рисунку 61.

**66. Дугові печі.** Першою дуговою піччю, що застосовувалася і для наукових досліджень, була піч Муассана, винайдена в 1892 р.



Утворюючи вольтову дугу всередині простору, оточеного вогнетривкою цеглою та іншими ізоляторами тепла (рис. 62), дістають так звані електричні печі з температурою в  $4000^{\circ}$ . Ці печі застосовуються для наукових потреб — для дослідження властивостей тіл при високих температурах, а також для технічних потреб — для одержання речовин, добуваних при високих температурах.

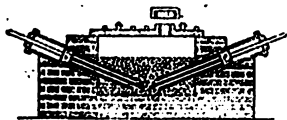


Рис. 62. Електрична піч Муассана.

В електричній печі Муассана всі туготопкі елементи стають рідкими, крім вуглецю, який з твердого стану переходить прямо в пару.

Найгодовніші технічні застосування печі такі.

1. Одержання при температурі печі сполуки кальцію й вуглецю — кальцій-карбід — через відновлення негашеного вапна вугіллям. При діянні води на кальцій-карбід виділяється газ ацетилен, вживаний для освітлення (ацетиленові ліхтарі) і для одержання високих температур в суміші з киснем (ацетиленове зварювання і різання металів).

2. Одержання в печі сполуки кремнію й вуглецю — карборунду — речовини дуже великої твердості; карборунду вживається на вироблення точильних каменів для точіння інструментів.

3. При температурі електричної печі утворюються з азоту повітря оксиди азоту, а з них — нітратна кислота і її солі. Ці ж останні мають дуже широке застосування в сільськогосподарській техніці як добриво.

Дугові печі для топлення сталі мають дуже різноманітну будову. В одній з перших дугових печей виробничого типу, збудованій Стассано в 1898 р., застосовуються вуглинці, між якими утворюється дуга, теплом якої топиться шихта.

Коефіцієнт корисної дії дугових печей доходить до  $78\%$ ; витрата енергії — близько 700 кіловат-годин на тонну литва.

67. Електричне зварювання. Зварювання вносить переверот в металообробну промисловість. Електричне зварювання застосовується як у нових, так і в ремонтних роботах. В нових роботах воно має застосування для зварювання листів і порожнистих тіл, витісняючи стару заклепочну скріпку, для зварювання листів і стрижнів встик, для зварювання рейок, проводів і т. д.

Особливе значення має зварювання в ремонтних роботах, бо дає можливість відновити зношені й пошкоджені частини (рис. 63), які без цього викидалися б у лом і замінялися б новими частинами.



Рис. 63. Електрозварювання.

Зварювання дає велику економію в матеріалі, у вартості робіт, в часі виконання і забезпечує безумовну міцність полагодженої частини.

Електрозварювання робиться різними способами. Зварювана деталь сполучається з негативним полюсом генератора. До неї підноситься електрод з вугілля або такого ж металу, як і деталь. Вольтова дуга, що утворюється, розтоплює метал, який заповнює в рідкому стані наявну тріщину (рис. 64).

Другий спосіб полягає в тому, що обидві частини зварюваної речі робляться електродами і топлення їх викликається джоулевим теплом, що розвивається в місці найбільшого опору — на стику зварюваних частин.

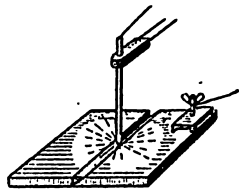


Рис. 64. Зварювання способом Слав'янова.

68. Електричні термометри. В міру розвитку металургії, в міру розширення витоку високоякісних сталей і різних нових стопів точне вимірювання температури, необхідної для забезпечення високої якості матеріалу, висувається на одне з перших місць серед найважливіших проблем виробництва. Найнадійніший спосіб вимірювання температури печі дає електричний термометр. Електричні термометри застосовуються і для вимірювання невисоких температур, звичайно обслуговуваних рутинними термометрами, в тих випадках, коли місце спостереження показу температури віддалене від місця вимірювання самої температури.

Будова електричних термометрів опору заснована на зміні опору провідника із зміною його температури за формулою:

$$R = \frac{\rho l}{S} \cdot (1 + \alpha t).$$

Будова електричного термометра опору зображена на рисунку 65. Опір виготовляється здебільшого з платинової спіралі, втопленої в кварцову трубку, яка вміщується в металічний футляр для захисту від пошкоджень.

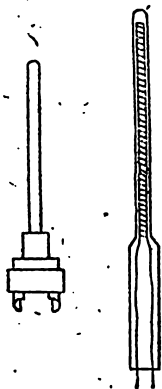


Рис. 65. Вигляд електричного термометра.

#### Вправа 10.

1. Від запобіжників ідуть два мідних проводи завдовжки по 1 м і перерізом в 1,5 мм<sup>2</sup>; в кінці їх ввімкнені жарові лампи. Напруга на ввідних затискачах — 120 вольтів. Проводи захищені запобіжниками, що топляться при 7,5 ампера. Чи розтопляться запобіжники, якщо станеться коротке замикання перед самими лампами (на віддалі 1 м від запобіжника)?

2. Від станції до будинку, в якому ввімкнено паралельно 200 жарових ламп, що споживають кожна 0,5 ампера при напрузі в 110 вольтів, проведених на віддалі 1 км два мідних проводи перерізом в 25 мм<sup>2</sup>. Яка кількість тепла виділяється в колі за 1 секунду? Який процент від загальної потужності, розвиваної в усьому колі, становить потужність, що йде на нагрівання

підвідних проводів? Яка кількість теплоти стала б виділятися, якщо зменшити опір підвідних проводів, збільшивши їх переріз до  $35 \text{ мм}^2$ ? Який процент становила б втрата на їх нагрівання в цьому випадку? Скільки пішло б зайвого матеріалу провода у другому випадку порівняно з першим?

*Відп.* 1161,6 кал;  $56\frac{1}{6}\%$ ;  $\approx 1380$  кал;  $\approx 48\%$ ; 178 кг.

3. Від джерела струму, що має напругу в 250 вольтів і потужність 10 кіловат, передається енергія на віддалі 8 км (проводи — прямий і зворотний). Розрахуйте втрати енергії на нагрівання за рік для перерізу в 25, 35, 50, 70,  $95 \text{ мм}^2$ , якщо струм проходить в середньому 10 годин на добу.

4. Якби в попередній задачі енергію довелося передавати на віддалі 10 км, то який переріз провода треба було б вибрати, щоб втрата енергії на нагрівання становила той же процент, що і при перерізі в  $70 \text{ мм}^2$ ?

5. Який переріз провода треба було б взяти в попередній задачі, якби довелося передавати на ту саму віддалі ту саму потужність, але тільки при напрузі в 10 000 вольтів? 10 000 вольтів?

6. Довжина платинової дріттини електричного термометра Сіменс і Гальске дорівнює 60 мм і діаметр дорівнює 0,3 мм. Знайти її опір при  $0^\circ$  і граничній температурі користування термометром в  $900^\circ$ .

### III. МАГНІТНЕ ПОЛЕ.

69. Магнітна дія струму. Електричний струм дає магнітну дію. На великих металургічних заводах можна бачити особливу

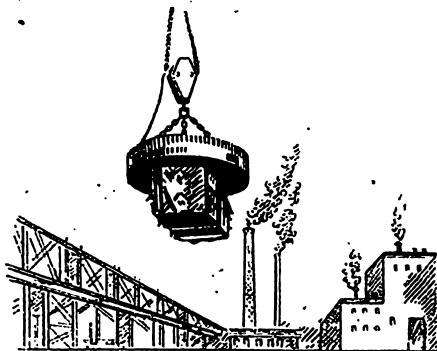


Рис. 66. Електромагнітний кран.

підойму, так званий електромагнітний кран, призначений для підймання і перенесення залізних, сталевих, чавунних матеріалів і виробів. Цей електромагнітний кран (рис. 66) складається з низького залізного циліндра, на поверхні якого намотано у вигляді котушки провід. Коли по проводу проходить електричний струм, кран притягує до себе залізні і сталеві предмети, як це показано на рисунку. З припиненням струму притягання також припиняється.

Вивчення магнітної дії електричного струму можна вести тими ж засобами і з допомогою тих же величин, які застосовуються при вивченні постійних магнітів.

Тому спочатку згадаємо основні властивості постійних магнітів.

70. Основні властивості постійних магнітів. Магнітами називаються тіла, що притягують до себе залізи і сталеві предмети<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Магнетизм проявляється не тільки в притяганні залізних і сталевих предметів, а й у намагнічуванні їх, у зміні розмірів тіл при намагнічуванні, у впливі на деякі світлові явища та в інших явищах.

Магніти бувають природні і штучні. Природні магніти — куски руди магнітного залізняку, що складається з залізоII-залізоIII-оксиду ( $Fe_3O_4$ ). Найбільш відомі поклада цієї руди є на Уралі (гори Благодать, Магнітна, звідси назва міста Магнітогорськ) і в Курській області.

Штучні магніти виготовляються в формі прямих або підковоподібних штаб із сталі (рис. 67).

Крім заліза і його похідних — сталі й чавуну — магнітні властивості виявляють в слабшій мірі метали: кобальт, нікель і стопи Гейслера<sup>1</sup>.

У магніті притягальна дія виявляється не рівномірно по всій поверхні, а зосереджується в двох місцях, що називаються полюсами і поділені лінією, по якій не проявляється притягальної дії і яка називається нейтральною (рис. 68).

Обидва полюси кожного магніта діють на один і той же полюс другого магніта прямо протилежно. Отже, магнетизми полюсів кожного магніта виявляються різномісними, тому полюси дістають різні найменування: один полюс називається північним (позитивним) і позначається буквами *N* або *n*, другий — південним (негативним) і позначається буквами *S* або *s*.

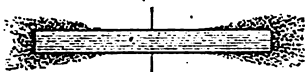


Рис. 68. Полюси і нейтральна лінія магніта.

Поділом магніта на частини неможливо одержати кусок магніта з одним полюсом. *Всяка частина магніта являє собою магніт з двома полюсами.*

На цій підставі магнетизм розглядається як властивість молекул (молекулярний магнетизм) (рис. 69).

Всякий підвищений або підпертий магніт так, що він може вільно обертатися, набуває в кожному місці Землі цілком певного напрямку. Вертикальна площина, що проходить через полюси такого магніта, називається площиною магнітного меридіана. Переріз цієї площинною поверхні Землі називається магнітним меридіаном.

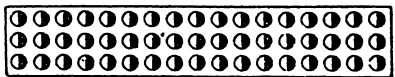
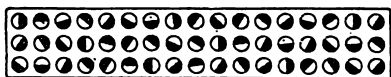


Рис. 69.

Безладне (а) розташування молекулярних магнітів в немагнітному тілі і впорядковане (б) при намагнічуванні (див. § 84).

<sup>1</sup> Стопи Гейслера складаються з міді, марганцю і алюмінію. Стоп з найкращою магнітною властивістю містить 14,3% Al, 28,6% Mn і 57,1% Cu.

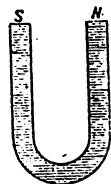


Рис. 67. Прямий і підковоподібний магніти.

Майже у всіх місцях Землі магнітний меридіан не збігається з географічним, відхиляючись від нього в той чи інший бік на різні і порівняно невеликі кути.

Для встановлення магнітного меридіана зручно користуватися так званою магнітною стрілкою — тонким магнітом, що виготовлений у формі витягнутого ромба і вільно обертається навколо вертикальної осі (рис. 70).

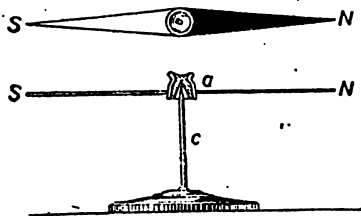


Рис. 70. Магнітна стрілка.

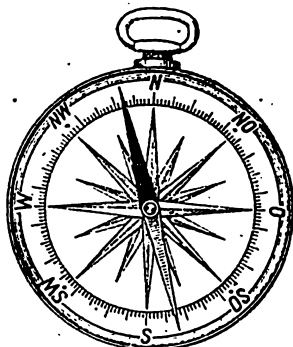


Рис. 71. Компас.

Магнітна стрілка входить до складу компаса — прилада (рис. 71), що дає можливість за напрямом магнітної стрілки визначити напрям сторін горизонту.

Той факт, що магнітна стрілка всюди набуває певного напрямку, приписується тому, що сама Земля є магніт (земний магнетизм).

71. Закон Кулона для взаємодії полюсів. Спроби з двома магнітними стрілками показують, що *однойменні полюси відштовхуються, різнойменні притягуються.*

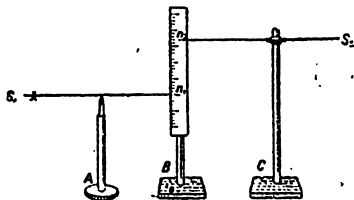


Рис. 72. Прилад для доведення закону Кулона.

Кулон перший вивчив кількісне співвідношення для цієї взаємодії і тим поклав основу точному науковому дослідженню цієї галузі фізики.

Закон Кулона можна продемонструвати на такій установці (рис. 72). Тонкий намагнічений стрижень  $n_1s_1$  (в'язальної спиці) укріплений так, що він може обертатися навколо горизонтальної осі. Другий такий же магніт укріплений у вертикальному штативі, вздовж якого він може переміщатися. Якщо вмістити однойменні полюси  $n_1$  і  $n_2$  обох магнітів на одній вертикалі, як показано на рисунку, то обертовий магніт відхилиться. Вмістивши на другий бік магніта тягар, можна вернути обертовий стрижень в горизонтальне положення. У цьому випадку обертовий момент сили вміщеного тягара зрівноважує обертовий

момент сили взаємодії полюсів. З рівності моментів і з вимірювання пліч можна обчислити саму силу взаємодії.

Міняючи віддалі між полюсами, вимірювану за вертикальним масштабом, можна знайти залежність між силою і віддаллю при одних і тих же полюсах.

Складаючи стрижень з однієї, двох, трьох однаково насаджених спиць і вміщуючи їх на тій самій віддалі від закріпленого магніта, можна знайти залежність між силою взаємодії і кількістю магнетизму одного магнітного полюса при незмінній віддалі обох магнітів. Вставляючи дві-три намагнічені спиці в штатив, можна вивчити вплив кількості магнетизму другого магніта на той самий полюс рухомого магніта і при тій самій віддалі.

Ці спроби заставляють ввести поняття про кількість магнетизму в полюсі, або про магнітну масу.

Закон Кулона для взаємодії полюсів дістає такий вигляд:

*Сила взаємодії двох точкових магнітних полюсів у пустоті прямо пропорціональна добутковій магнітних мас полюсів і обернено пропорціональна квадратові віддалі між ними.*

Якщо позначити масу одного полюса через  $m$ , масу другого — через  $m_1$ , віддалі полюсів через  $r$ , силу взаємодії через  $F$  і множник пропорціональності через  $k$ , то закон можна буде виразити такою формулою:

$$F = \frac{km m_1}{r^2}$$

Щодо знака сили мають місце ті ж міркування, що їх вивчено для сили взаємодії двох електричних зарядів (§ 6).

72. **Одиниця магнітної маси.** Щоб установити одиницю магнітної маси, припустимо, що взаємодіють однакові маси  $m = m_1$  і що  $r = 1$  см,  $F = 1$  дин і  $k = 1$ ; тоді за одиницю магнітної маси береться така магнітна маса, яка діє в пустоті на рівню її магнітну масу на віддалі 1 см з силою в 1 дину.

Ця одиниця називається одиницею магнітної маси в системі CGS і позначається через CGSM магнітної маси.

При такому виборі одиниць формула набуває вигляду:

$$F = \frac{m m_1}{r^2}$$

звідки при даних умовах:

$$1 \text{ дин} = \frac{1 m^2}{1^2 \text{ см}^2}, \text{ або } m = \sqrt{1 \text{ дин} \cdot \text{см}^2}.$$

Найменування одиниці магнітної маси в системі CGSM одержимо, вводячи у вираз для  $m$  найменування дини.

Одиниця магнітної маси CGSM має найменування

$$\sqrt{\frac{2 \cdot \text{см}}{\text{сек}^2} \cdot \text{см}^2} = 2^{\frac{1}{2}} \text{ см}^{\frac{3}{2}} \text{ сек}^{-1}.$$

73. **Магнітне поле. Напруженість поля.** Як і електричний заряд магнітний полюс діє на тіла, які знаходяться на віддалі від нього: притягує залізні предмети, обертає магнітну стрілку.

Простір, в якому виявляється дія магніта на тіла, називається магнітним полем магніта.

Для порівняння різних полів користуються особливою величиною, що називається напруженістю поля.

Напруженість поля є величина, вимірювана силою, з якою поле діє на одиницю позитивної магнітної маси.

Якщо позначити напруженість магнітного поля через  $H$ , то:

$$H = \frac{F}{m_1}; \text{ і для точкової магнітної маси: } H = \frac{m}{r^2}.$$

Одиниця напруженості в системі CGSM називається ерстед. Ерстед є напруженість такого поля, яке діє на одиницю магнітної маси з силою в 1 дину.

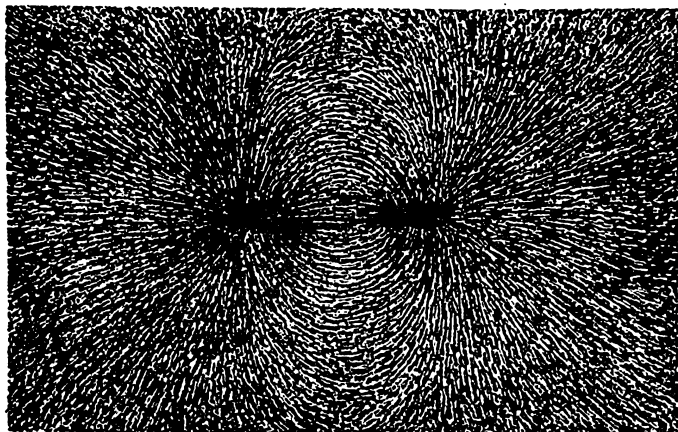


Рис. 73. Силові лінії постійного прямого магніта.

74. Силові лінії магнітного поля. Вивчити магнітне поле магніта — це значить уміти для кожної точки визначити вектор напруженості поля. Напрямок діючих у полі сил можна було б вивчити, розміщаючи по полю маленькі магнітні стрілки. Магнітні стрілки тим точніше показували б напрям сил, чим менші були б самі стрілки. Найкращими показниками є дрібні залізни опилки, які в магнітному полі самі стають магнітами.

Посипаючи екран, під яким лежить прямий магніт, залізними опилками, дістають певне розміщення опилок (рис. 73).

Лінії, по яких розміщаються залізни опилки в магнітному полі, називаються силовими лініями магнітного поля. Знаючи напрям силових ліній, можна легко знайти напрям напруженості в будь-якій точці.

Напруженість у будь-якій точці направлена по дотичній до силових ліній в цій точці. Тому силову лінію можна визначити

так: силовою лінією називається така лінія, дотична до якої у будьякій точці дає напрям напруженості поля в цій точці.

Силовим лініям приписують напрям: вважається, що силова лінія виходить з північного полюса магніта і входить у південний.

Тоді сила, з якою поле діє на північний, або позитивний, полюс в якійнебудь точці поля, направлена по дотичній у напрямі силової лінії; сида ж, з якою поле діє на південний, або негативний, полюс, направлена також по дотичній, але в бік, протилежний напрямку силової лінії.

Дослідження показують, що є поле і всередині магніта, отже, і всередині магніта проходять силові лінії. Таким чином, силові лінії магнітного поля є замкнені криві<sup>1</sup>. Рисунок 74 дає

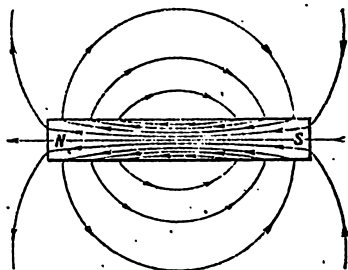


Рис. 74. Схема розміщення силових ліній прямого магніта.

схематичне зображення силових ліній поля прямого магніта.

Рисунок 75 дає розміщення силових ліній підковоподібного магніта.

Нарешті, якщо утворити силові лінії двох прямих магнітів, розміщених по одній прямій і обернених один до одного різноіменними полюсами (рис. 76), і згадати, що такі полюси притягуються, то можна помітити, що при притяганні силові лінії вкорочуються. Явище відбувається так, немов би вздовж силової лінії був натяг, як у гумовому шнурі.

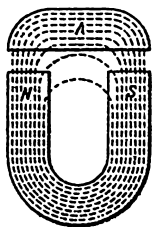


Рис. 75. Силові лінії підковоподібного магніта.

А — залізний шкiр.

Якщо ж утворити силові лінії двох прямих магнітів, обернених один до одного однойменними полюсами (рис. 77), які відштовхуються, то можна помітити, що при цьому відштовхуванні силові лінії, що йдуть в одному напрямі, віддаляються одна від одної, немов би теж відштовхуються. Явище відбувається так, немов би вперек силових ліній існував боковий тиск, знову ж таки подібно до тиску в гумовому шнурі, що стискається.

Зображаючи стан поля з допомогою силових ліній і приписуючи їм натяг уздовж них і боковий тиск перпендикулярно до них, Фарадей (1791—1867) дав дуже зручний прийом не тільки описувати відомі вивчені явища, а й передбачати нові.

При погляді на розміщення опилок у магнітному полі видно, що в різних місцях поля густина їх розміщення, тобто число

<sup>1</sup> Позірний розрив силових ліній на екрані пояснюється малою силою поля, недостатньою для переміщення опилок на далекій віддалі.



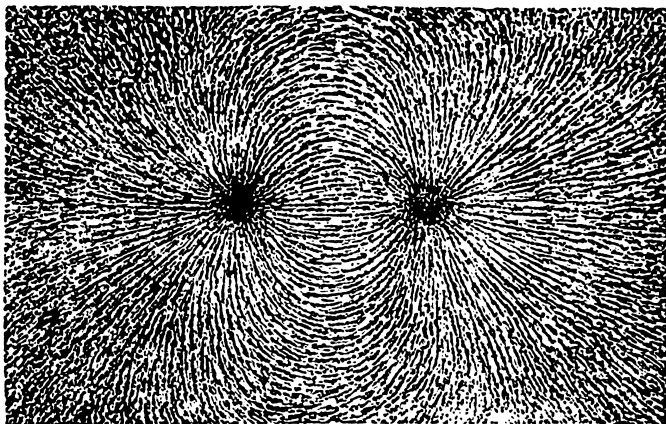


Рис. 76. Силові лінії між різнойменними полюсами двох магнітів.

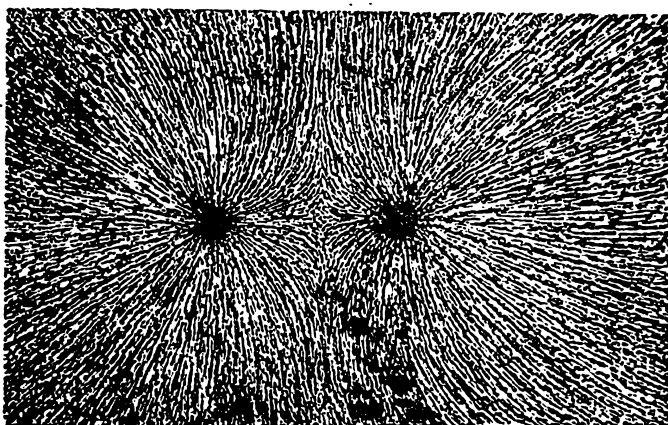


Рис. 77. Силові лінії між однойменними полюсами двох магнітів

ліній, що проходять через  $1 \text{ см}^2$  площі, перпендикулярно до площі, різна. Густота більша поблизу полюсів і менша вдалині від них. Так само й напруженість більша поблизу полюсів і менша вдалині від них. Отже, густота розміщення силових ліній може характеризувати величину напруженості поля в цьому місці.

*Магнітне поле, силові лінії якого паралельні і в усіх місцях поля проходять з однаковою густотою, називається однорідним.* Таким є поле посередині між різнойменними плоскими й паралельними полюсами при значній величині їх поверхні.

**75. Магнітна індукція.** Якщо укріпити ненамагнічений стрижень з м'якого заліза в штативі (рис. 78) і піднести до нього зверху магніт на якусь віддаль (гобто ввести залізо в магнітне поле), то залізний стрижень набуває здатності притягувати опилки, цвяхи та інші дрібні залізні тіла. В присутності магніта кусок заліза сам стає магнітом. Після віддалення магніта м'яке залізо розмагнічується. Якщо в попередній спробі при тому положенні магніта, що зображене на рисунку 78, піднести до заліза магнітну стрілку, то напрям її обертання показує, що на кінці заліза, ближчому до південного полюса магніта, виникає північний полюс, а на віддаленому — південний полюс. При повертанні магніта північним полюсом до заліза на ближчому до північного полюса кінці заліза виникає південний полюс, на віддаленому — північний.

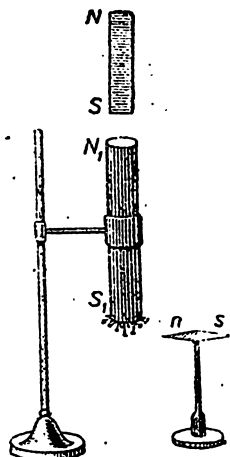


Рис. 78. Намагнічення через індукцію.

Таке ж збудження магнетизму виникає і в куску сталі.

Збудження магнетизму в залізі і сталі при наближенні магніта відбувається і тоді, коли поміщати між магнітом і стрижнем листи скла, картону, дерева, міді та інших матеріалів (крім намагнічуваних, головним чином крім заліза).

Всі попередні спроби показують, що при наближенні магніта до куска м'якого заліза або сталі в останньому „наводиться“ магнетизм, при чому на кінці, ближчому до полюса магніта, „наводиться“ полюс різнойменний, на кінці віддаленому — полюс однойменний з впливаючим.

Збудження магнетизму в кусках заліза і сталі, введення в магнітне поле, називається магнітною індукцією, або магнітним впливом. Після видалення заліза або сталі з магнітного поля магнетизм м'якого заліза легко зникає, магнетизм сталі зберігається, і потрібен значний магнітний вплив у протилежному напрямі для його знищення.

Магнетизм, що зберігається в тілі після видалення його з магнітного поля, називається залишковим магнетизмом.

Залишковий магнетизм пояснюють існуванням у тілі так званої затримної (коерцитивної) сили. Через те що затримна сила сталі багато більша, ніж м'якого заліза, то можна сказати, що залишковий магнетизм сталі стійкіший, ніж заліза; тому постійні магніти робляться з сталі.

Пророблена спроба дає можливість відповісти на питання, як відбувається притягання магнітом заліза і сталі. Із спроби

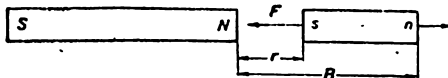


Рис. 79. Пояснення притягання тіл магнітом.

видно, що при самому внесенні в магнітне поле куска заліза або сталі він стає магнітом, при чому ближчі полюси — навідний і наведений — завжди різноименні. Полюс  $N$  (рис. 79) навідного магніта притягує наведений полюс  $s$  і відштовхує наведений полюс  $n$ ; але через те що віддаль  $r$  від  $N$  до  $s$  менша віддалі  $R$  від  $N$  до  $n$ , а дія зменшується з віддаллю, то притягання більше відштовхування, і кусок притягається до магніта.

Порівнюючи хід силових ліній всередині заліза (рис. 80, пор. з рис. 74) з ходом силових ліній в тому ж місці в повітрі при відсутності заліза, можна бачити, що силовий потік, тобто число силових ліній, через поперечний переріз заліза буде густіший, ніж силовий потік через такий же переріз у повітрі. Під впливом магніта, що утворює поле, залізо намагнічується по індукції і само створює магнітне поле. Тому в тому місці, де знаходиться залізо, обидва поля складаються, і число силових ліній, що проходять через  $1\text{ см}^2$ , збільшується.

Таке ж явище, тільки в багато слабшій мірі, спостерігається в сталі, чавуні, нікелі, кобальті, в стопах марганцю й міді або марганцю й алюмінію.

Відношення числа магнітних силових ліній через якунебудь площу в присутності даної речовини до числа магнітних силових ліній через таку ж площу при відсутності цієї речовини (у пустоті) визначає окрему для кожної речовини величину, що називається магнітною проникністю.

Для більшості речовин їх магнітна проникність близька до одиниці. Тільки для заліза, нікелю, кобальту — так званих феромагнітних речовин — вона значно більша одиниці, — особливо велика вона для заліза.

Магнітна проникність не є постійною для даної феромагнітної речовини. Вона залежить від напруженості того поля, в яке речовина вноситься.

Початкові спроби над притяганням магнітом залізних тіл могли навести на думку, що дія магніта виявляється на віддалі

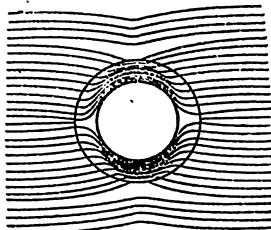


Рис. 80. Силові лінії йдуть майже цілком всередині заліза.

без допомоги проміжних тіл. Це припущення підтверджувалось з першого погляду тим спостереженням, що магніти взаємодіють один з одним і в пустоті, тобто, коли вони вміщені в просторі, звідки викачано повітря. Згідно з тогочасним поглядом, що тяжіння діє безпосередньо між тілами на віддалі без участі проміжного середовища, встановилося таке ж уявлення про існування такої ж «дальності» і між магнітами, і між електричними зарядами.

Фарадей відкинув уявлення про дальність і висунув на перше місце значення середовища при виникненні взаємодії тіл.

Фарадей вважав, що електричні і магнітні дії передаються через так званий світовий ефір. Світовий ефір — це особлива форма матерії, яка заповнює весь світовий простір.

Введені Фарадеєм магнітні силові лінії, можливо, мають значення не тільки зовнішнього прийому вивчення й зображення магнітного поля, а й являють собою ті напрями, по яких відбувається зміна ефіру в даному місці при утворенні в ньому магнітного поля.

76. Порівняння силових ліній магнітного і електричного полів. Навчившись одержувати силові лінії електричного і магнітного полів, природно поставити питання про порівняння їх між собою. Щодо зовнішності вони мають багато схожого. Так, хід силових ліній між двома електричними зарядами — різноіменними і однойменними (рис. 12, 13) — нагадує розміщення ліній між двома такими ж магнітними полюсами (рис. 76, 77). Але по суті між цими двома системами ліній є глибока відмінність. Електричні силові лінії впираються в електричний заряд, тим часом як магнітні силові лінії завжди замкнені криві (§ 74). В той час, як на кінці електричної силової лінії знаходяться дійсно існуючі електричні заряди, всі точки замкненої магнітної силової лінії цілком однакові: на них ніде немає магнітних зарядів — кількостей магнетизму. Кількості магнетизму є уявними; вони введені тільки для зручності при описі явища. Полюси магніта є не місцями зосередження кількостей магнетизму, а місцями, де магнітні силові лінії переходять з середовища з одними магнітними властивостями в середовище з іншими магнітними властивостями, зазнаючи заломлення на границі.

Отже, нема окремо існуючих кількостей магнетизму, а є тільки магнітне поле.

77. Земний магнетизм. Як відомо, магнітна стрілка, що вільно обертається навколо вертикальної осі, в кожному місці Землі займає певний напрям, але цей напрям міняється від місця до місця. Напрямок магнітної осі<sup>1</sup> такої стрілки в кожному місці Землі збігається з магнітним меридіаном даного місця. Кут, утворений магнітним меридіаном  $SN$  з географічним  $CD$ , називається кутом магнітного схилення. Сама магнітна стрілка, що вільно обертається в горизонтальній площині навколо вертикальної осі, називається магнітною стрілкою схилення. Схилення

<sup>1</sup>Магнітною віссю називається пряма, що сполучає точки полюсів магніта.

називається східним, якщо північний полюс стрілки відхиляється на схід від географічного меридіана, і з а х і д н и м, якщо — на захід (рис. 81). Лінія, що сполучає всі точки земної кулі, в яких схилення дорівнює нулеві, називається нульовим магнітним меридіаном. Він поділяє земну кулю на дві півкулі з східним і західним магнітними схиленнями. Існування нульового магнітного меридіана відкрив Колумб в 1492 р.

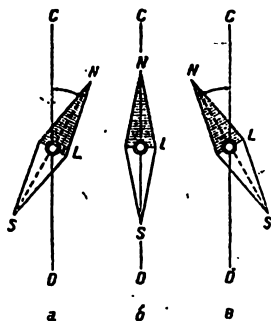


Рис. 81. Куты магнітного схилення.

Якщо магнітна стрілка може вільно обертатися навколо горизонтальної осі у площині магнітного меридіана, то така стрілка встановлюється під певним кутом до горизонту; цей кут від місця до місця на земній поверхні змінюється. Кут з горизонтальною площиною  $HN$  магнітної осі  $SN$  стрілки, що обертається в площині магнітного меридіана, називається кутом магнітного нахилення (рис. 83). Сама стрілка, що вільно обертається в площині магнітного меридіана навколо горизонтальної осі  $ab$ , називається стрілкою нахилення (рис. 82). Нахилення називається північним, коли північний полюс стрілки лежить нижче її осі, і південним, коли — нижче осі опускається південний полюс (рис. 83). Лінія, що сполучає всі точки Землі, в яких нахилення дорівнює нулеві, називається магнітним екватором. Магнітний екватор лежить недалеко від географічного і поділяє земну кулю на дві півкулі: з північним і південним нахиленнями. Через те що схилення й нахилення магнітних стрілок спостерігаються повсюдно на земній поверхні, то це вказує на повсюдне існування магнітного поля. Це поле називається земним магнітним полем. Походження земного магнетизму невідоме. В усякому разі воно не залежить від магнетизму порід, що входять до складу земної кори, які мають дуже мале намагнічення і дуже високу температуру<sup>1</sup> в глибоких шарах.

Напруженість земного магнітного поля направлена в площині магнітного меридіана під кутом нахилення до горизонту; вона різна для різних місць Землі. Силкові лінії земного магнітного поля для кожного місця Землі можна вважати за прямі, що лежать у площині магнітного меридіана паралельно стрілці нахилення. Для кожного місця Землі магнітне земне поле однорідне.

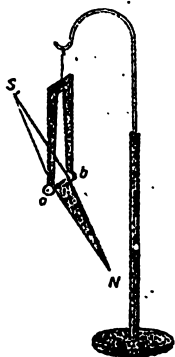


Рис. 82. Стрілка нахилення.

<sup>1</sup> Намагнічені тіла втрачають свій магнетизм в міру нагрівання.

Ті точки земної кулі, де стрілка нахилення стоїть вертикально, називаються магнітними полюсами Землі. У північній географічній півкулі, де стрілка опущена до Землі своїм північним полюсом, лежить негативний полюс земного магнетизму, в південно-му — позитивний. Магнітні полюси не збігаються з географічними.

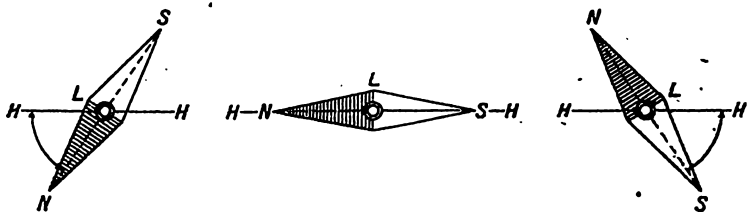


Рис. 83. Куты магнітного нахилення.

78. Магнітні аномалії. Пильне вивчення трьох елементів земного магнетизму — схилення, нахилення і напруженості магнітного поля — показує, що вони зазнають періодичних змін: дуже малих — добових і річних — і дуже значних — вікових. Так, у Парижі, де магнітні спостереження ведуться давно, відмічено, що до середини XVII ст. схилення було східним, потім стало рівним нулеві, тепер воно західне.

Добові і річні зміни залежать від зміни освітлення Землі Сонцем протягом доби і року.

Крім періодичних змін, елементи земного магнетизму зазнають час від часу дуже різних і великих, але короткочасних змін, які називаються магнітними бурями. Вони завжди зв'язані з полярними сйвами; інтенсивність цих останніх перебуває в залежності від числа сонячних плям.

В окремих місцях Землі спостерігаються іноді на порівняно невеликому протязі значні відхилення величини елементів магнітного поля Землі порівняно з значеннями їх в сусідніх місцях, тоді як взагалі зміна елементів відбувається поступово. Такі відхилення називаються магнітними аномаліями. Причина їх може полягати і в місцевому скупченні магнітних руд. Такою є, наприклад, знаменита Курська аномалія в Росії, дослідження якої привело до відкриття величезних покладів залізної руди.

### Вправа II.

1. До полюса магнітної стрілки піднесено збоку стальну штабу; полюс відхилився; чи намагнічена штаба?

2. До полюса магнітної стрілки піднесено збоку стальну штабу; полюс притягнувся; чи намагнічена штаба?

3. Як з допомогою магнітної стрілки узнати, чи намагнічений стальний стрижень?

4. Дано два однакових сталених стрижні, з яких один намагнічений. Як узнати, який саме намагнічений, якщо більше не дано ніяких приладів?

5. Чи можна намагнітити земним магнетизмом стальний стрижень, умістивши його в площині магнітного меридіана паралельно стрілці нахилення? Якщо можна, то на якому кінці стрижня буде північний полюс?

6. Чому сталеві штаби і рейки, що лежать на складах, виявляються намагніченими? В якому напрямі щодо сторін горизонту вони повинні лежати, щоб намагнічення було найсильнішим?

7. Чи буде магнітна стрілка вільно (тобто без бокового тиску на вісь) обертатися навколо вертикальної осі, пропущеної через її центр ваги?

8. Де треба пропустити через магнітну стрілку вертикальну вісь, щоб стрілка вільно оберталася навколо неї (розглянути окремо для північної і південної магнітних півкуль)?

9. Чи буде заряджена електрикою паличка притягувати або відштовхувати кінець магнітної стрілки схилена? Якщо заряджена електрикою паличка діятиме на кінець магнітної стрілки, то чи залежатиме це діяння від знака полюса?

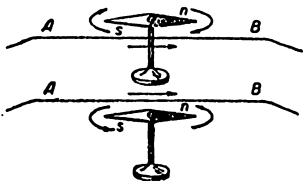


Рис. 84. Відхилення струмом магнітної стрілки з положення рівноваги.

Північний полюс стрілки переміщається в бік читача; коли ж провідник проходить над стрілкою, північний полюс відхиляється від читача. Якщо змінити напрям струму на протилежний, то в обох випадках переміщення північного полюса зміниться так само на протилежне.

Ці чотири експерименти виявляють, поперше, що *проходження електричного струму завжди супроводиться виникненням магнітного поля* і, подруге, що напрями сил магнітного поля змінюються від точки до точки.

Щоб запам'ятати, куди відхилиться північний полюс магнітної стрілки при заданому положенні провідника і заданому напрямі струму, можна скористуватися таким практичним правилом, виведеним з тих же експериментів: якщо вмістити пальці правої руки на провідник у напрямі проходження струму і долоню обернути до стрілки, то витягнутий великий палець покаже напрям обертання північного полюса стрілки (правило великого пальця правої руки).

Магнітні явища, спричинювані електричним струмом, називаються електромагнетизмом.

Напряма магнітних силових ліній у магнітному полі струму може бути виявлений так само, як і для постійного магніта, з допомогою залізних опилок.

80. **Магнітне поле струму.** Щоб знайти розміщення магнітних силових ліній струму, треба пропустити провідник через екран, вищений перпендикулярно до провідника, посипати екран тонким шаром залізних опилок і стукати злегка по ньому при проходженні по провіднику струму: тоді розподіл опилок покаже розміщення силових ліній. Щоб визначити напрям силових ліній, треба навколо провідника з струмом поставити багато маленьких

79. **Дослід Ерстеда.** Магнітну дію струму вперше виявив датський учений Ерстед в 1820 р. Якщо вмістити провідник паралельно магнітній стрілці під нею або над нею, то при пропусканні по провіднику струму магнітна стрілка виходить з площини магнітного меридіана і утворює з ним якийсь кут. При показаному на рисунку 84 напрямі струму, коли провідник протягнуто під стрілкою,

магнітних стрілок<sup>1</sup>. Напрями, куди будуть звернені північні полюси магнітних стрілок, покажуть напрями силових ліній.

Для прямолінійного струму рисунок 85 дає форму силових ліній; рисунки 86 і 87 показують розміщення магнітних стрілок, а рисунки 88 і 89 дають схематичне зображення форми і напрямку магнітних силових ліній у магнітному полі прямолінійного струму.

З рисунків видно, що магнітні силові лінії поля прямолінійного струму — концентричні кола, які розташовані в площинах, перпендикулярних до напрямку струму, а центри їх лежать на осі провідника.

Для запам'ятання напрямку силових ліній знаменитий англійський фізик М а к с в е л л (1831 — 1879) дав практичне правило свердлика: якщо угвинчувати свердлик в напрямку струму, то обертання рукоятки свердлика покаже напрям силових ліній струму (рис. 86 і 87).

Французькі учені Бі о і С а в а р на основі експериментальних вимірювань напруженості  $H$  магнітного поля прямого струму, величини струму  $I$  і віддалі точки поля  $r_0$  від провідника в перпендикулярному напрямі, відкрили співвідношення  $H = \frac{0,2I}{r_0}$ .

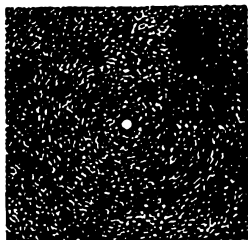


Рис. 85. Магнітні силові лінії прямолінійного струму.

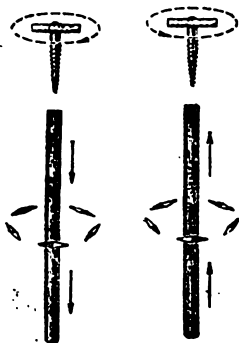


Рис. 86 — 87. Напрям магнітних силових ліній у магнітному полі прямолінійного струму.

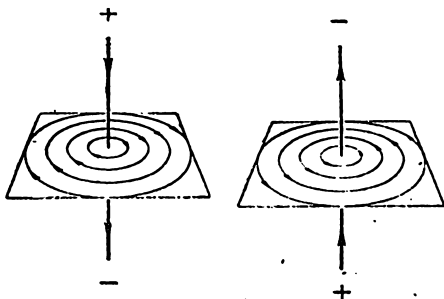


Рис. 88 — 89. Схеми розміщення магнітних силових ліній у магнітному полі прямолінійного струму.

Для кругового струму рисунок 90 дає розміщення магнітних силових ліній, а рисунки 91 і 92 — схему розміщення і напрямку магнітних силових ліній.

<sup>1</sup> Або переміщати навколо струму одну стрілку.



Силові лінії виходять з тієї сторони кругового струму, де спостерігачеві здається, що струм іде проти стрілки годинника, і входять у ту, де здається, що струм іде за стрілкою годинника.



Максвелл<sup>1</sup> (1831 — 1879).

Тому круговий струм подібний до магнітного листка, тобто такого магніта, в якому віддаль між полюсами дуже мала порівняно з розмірами тих поверхонь, де лежать полюси.

З досліду можна вивести, що напруженість поля  $H$  кругового струму в його центрі зв'язана з величиною струму  $I$  і радіусом кола провідника  $r$  співвідношенням  $H = \frac{0,2\pi I}{r}$ .

Рисунок 93 дає форму силових ліній для соленоїда, по якому протікає електричний струм, тобто для провідника, намотаного спіраллю на котушку, а рисунок 94 — схему і напрям їх.

Порівняння силових ліній струму в котушці з силовими лініями постійного магніта (рис. 73 і 74) показує, що поле струму, який іде по котушці (по соленоїду), своїми магнітними властивостями подібне до поля постійного магніта; північному полюсові магніта відповідає той кінець котушки, де для спостерігача, що дивиться ззовні, струм іде проти стрілки годинника, і південному полюсові — той, де струм іде за стрілкою годинника.

В двох останніх випадках правило свердлика допоможе знайти відносний напрям струму і силових ліній. В цих випадках треба обертати рукоятку-свердлика в напрямі кругового струму; тоді



Рис. 90. Магнітні силові лінії поля кругового струму.

<sup>1</sup> Максвелл Клерк народився поблизу Единбурга. З 1856 р. — професор фізики в Абердіні, з 1871 р. — в Кембріджі. Максвелл надав математичну форму ідеям Фарадея про електромагнітне поле, розробив теорію поля і на основі її зробив висновок про те, що зміни напруженості поля повинні поширюватися в навколишньому просторі хвилеподібно з швидкістю світла.

Це теоретичне дослідження майже на два десятки років випередило його експериментальне підтвердження.

Грунтуючись на зв'язку електричних, магнітних і світлових явищ і на своїх дослідженнях про електромагнітні коливання, Максвелл створив електромагнітну теорію світла і тим об'єднав в одне ціле розрізнені раніше галузі електрики, магнетизму і світла.

В галузі кінетичної теорії газів Максвелл дав закон розподілу швидкостей газових молекул.

поступний рух самого свердлика покаже напрям магнітних силових ліній поля (рис. 95).

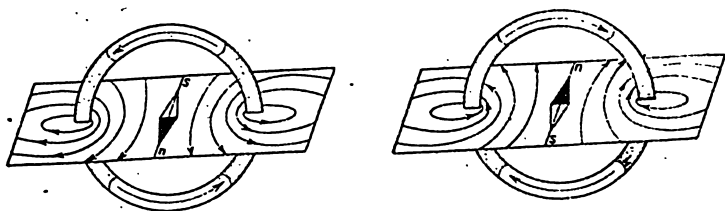


Рис. 91—92. Схеми розміщення магнітних силових ліній поля кругового струму

Теорія дає вираження для напруженості магнітного поля всередині тонкого і довгого соленоїда, який має довжину  $l$  і містить  $w$  витків, по яких тече струм  $I$ :

$$H = \frac{0,4\pi Iw}{l}$$

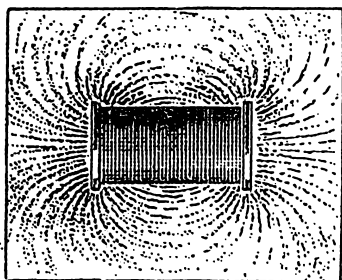


Рис. 93. Силові лінії поля соленоїда.

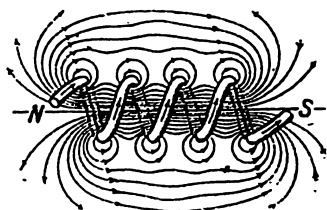


Рис. 94. Схема розміщення магнітних силових ліній поля соленоїда.

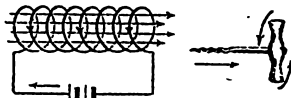


Рис. 95. Правило свердлика в застосуванні до соленоїда.

Добуток  $Iw$  називається числом ампервитків. Частина  $\frac{Iw}{l}$  показує, число ампервитків, що припадає на одиницю довжини соленоїда.

Формула показує, що напруженість поля всередині соленоїда прямо пропорційна числу ампервитків на одиницю довжини.

Якщо соленоїд тонкий і довгий, то, як показує рисунок 94, поле всередині його однорідне (силові лінії паралельні і проходять через будьякий переріз соленоїда однаково густо); напруженість поля в усіх точках однакова (не залежить від віддалі від осі соленоїда).

Тепер стає зрозумілим спосіб намагнічування постійних магнітів з допомогою електричного струму. Коли сталевий стрижень обмотано проводом і по ньому пропущено електричний струм, то навколо обмотки утворюється магнітне поле; всередині обмотки магнітні силові лінії йдуть паралельно осі котушки, отже, паралельно стрижневі. На тому кінці його, де силові лінії входять у стрижень, утворюється південний полюс магніта, де вони виходять, — північний.

Намагнічування струмом було вперше проведено французьким фізиком Араго в 1820 р.

Підймальна сила магніта вимірюється тією силою, яка необхідна для відривання від магніта притягнутого ним куска заліза при однаковому поперечному перерізі магніта і куска заліза.

Підймальна сила сталених магнітів доходить до 4 кг на 1 см<sup>2</sup> притягуючої поверхні.

81. Електромагніт. Магнітним полем струму, який проходить по котушці, можна скористуватися для виготовлення електромагніта. Електромагнітом називається стрижень з м'якого заліза, обмотаний ізольованим дротом, по якому проходить струм. При проходженні струму по дроту в стрижні і поза ним утворюється магнітне поле. Після припинення струму магнетизм заліза зникає майже без залишку.

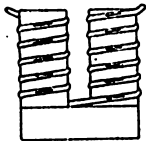


Рис. 96.  
Схема обмотки електромагніта.

Обмотку підковоподібного електромагніта треба робити на обох його кінцях у протилежних напрямках. Тоді при пропусканні по обмотці постійного струму на одному кінці йтиме струм за стрілкою годинника, а на другому — проти стрілки годинника. Схема обмотки і знаки полюсів залежно від напрямку струму показані на рисунку 96.

Як відомо з початкового курсу фізики, електромагніти застосовуються в електричному дзвоні, у телеграфних апаратах, в інших сигналізаційних апаратах, в електромагнітних кранах, в електричних машинах, в електричних моторах і в електричних вимірних приладах.

Тут спинимося тільки на описі електромагнітного телефону, не розібраного в курсі VII класу.

81а. Мікрофон і телефон. Два прилади — мікрофон і телефон — служать для передачі звуку на віддаль. Мікрофон<sup>1</sup> — прилад-передавальник, що сприймає на станції відправлення звуку, і телефон — прилад-приймач, що відтворює звуку на приймальній станції. В останньому приладі і застосовуються електромагніти.

Звукова хвиля, як відомо (ч. II), являє поширення поздовжніх коливань повітря; в звуковій хвилі відбувається чергування згущень і розріджень повітря.

Кожний звук характеризується тим чи іншим числом коливань на секунду. Призначення мікрофона — перетворити звукові коливання, що падають на нього, у коливання величини постійного електричного струму, що пропускається через мікрофон. Змінювати величину постійного струму в колі можна з допомогою зміни опору дільниці кола. Мікрофон так і робиться, щоб його електричний опір мінявся в такт звуковим коливанням, що падають на нього.

<sup>1</sup> Мікрофон — від грецьких слів: мікрос — малий; фон — звук; мікрофон — передавальник слабких звуків; телефон — від слів: теле — далеко, фон — звук; телефон — приймач звуків на далекій віддалі.

Мікрофон Еріксона (рис. 96 а) складається з вугільної колодки — круглої пластинки, у верхній частині якої зроблено шість вирізів по радіусах. В ці вирізи наливається вугільний порошок (З). Порошок зверху прикривається тонкою вугільною пластинкою, що називається мембраною (І). Всі ці частини вміщені в коробку, в якій пружно укріплена мембрана. Мембрана сполучається з одним кінцем електричного кола, колодка — з другим. Мембрана і колодка сполучаються між собою тільки через порошок. В те ж коло, в яке ввімкнені мембрана і колодка мікрофона, входять джерело струму і обмотка електромагнітів телефона на приймальній станції.

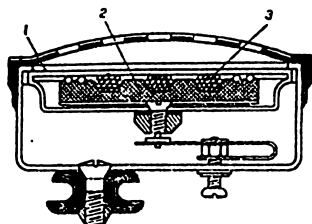


Рис. 96 а. Мікрофон Еріксона.

1 — вугільна мембрана, 2 — вугільна колодка,  
3 — вугільний порошок.

Коли перед мікрофоном відбувається розмова, на його мем-

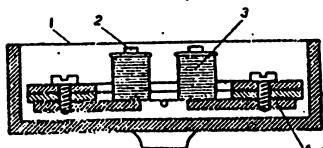


Рис. 96 б. Розріз телефона.

1—мембрана, 2—електромагніти, 3—обмотка електромагнітів, 4—постійний магніт.

брану попадають звукові хвилі. Коли на мембрану падає згущення повітря, то вона більше стискає вугільний порошок; число точок дотикання між зернятками вугільного порошку збільшується, і разом з цим зменшується опір цієї ділянки кола; а величина струму зростає. Коли ж згущення змінюється розрідженням повітря, тиск мембрани на порошок зменшується; в наслідок цього опір мікрофона збільшується, і величина струму зменшується. Протягом кожного періоду звукового коливання величина струму в електричному колі то збільшується, то зменшується. Таких змін величин струму буде на секунду стільки, скільки коливань звуку. Ці змінні величини струмів надходять у телефон.

Телефон (рисунок 96б) складається з сильного постійного магніта (4), до полюсів якого прикріплено по електромагніту (2) і (З); обмотка цих електромагнітів і входить у коло струму, що проходить через мікрофон. Рисунок 96б являє собою розріз телефона. Близько від осердя електромагнітів пружно укріплена тонка залізна пластинка - мембрана (І).

Всяке посилення величини струму в колі спричиняє збільшення магнітного поля електромагнітів, що тягне за собою посилення поля постійного магніта; мембрана телефона притягується сильніше до магніта. Всяке ж ослаблення величини струму тягне за собою ослаблення магнітного поля і відхід мембрани в наслідок пружності від магніта. Отже, мембрана телефона зробить стільки коливань за секунду, скільки їх робить величина струму в колі під впливом коливань мембрани мікрофона

Коливання мембрани телефону спричиняють коливання повітря, а ці останні сприймаються вухом того, хто слухає, як звук. Звуки, передавані телефоном, мають ту ж висоту, що і звуки, сприймані мікрофоном.

Крім описаних головних частин, телефонна установка доповнюється ще дзвоником для виклику слухача.

Телефон звичайно на кожній станції сполучається з мікрофоном в один прилад, утворюючи мікротелефон.

82. Дія магнітного поля на рухомий струм. Правило Флеммінга. Щоб виявити дію магнітного поля на струм, підві-

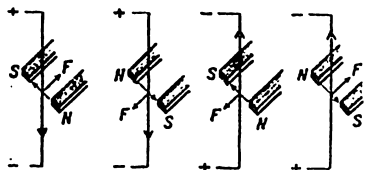


Рис. 97. Рух рухомого провідника із струмом у магнітному полі залежить від напрямку силових ліній і напрямку струму.

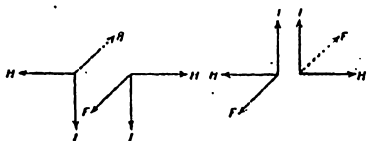


Рис. 93. Правило трьох пальців лівої руки Флеммінга.

вило трьох пальців лівої руки (рис. 98):

Треба розсунути під прямим кутом великий і вказівний пальці лівої руки, а середній поставити перпендикулярно до двох перших, потім вказівний палець направити в напрямі силової лінії, середній — в напрямі струму; тоді великий палець покаже напрям руху провідника.

На рисунку 98 букви  $H$  показують напрям магнітних силових ліній, букви  $I$  — напрямі струмів, букви  $F$  — напрямі руху провідника.

Вплив магнітного поля на провідник з струмом є наслідком взаємодії магнітних полів магніта і струму. Цю взаємодію можна пояснити на підставі тих натягів і бокових тисків, які приписуються, за Фарадеєм, силовим лініям магнітного поля.

Нехай рисунок 99 зображає розміщення силових ліній магніта і прямого струму, який іде перпендикулярно до рисунка від читача.

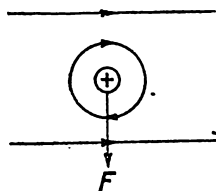


Рис. 99.

Паралельні прямі — силові лінії магнітного поля, коло — силова лінія струму,  $F$  показує напрям руху провідника.

У верхній частині рисунка силові лінії обох полів мають однакові напрями і взаємно відштовхуються; в нижній частині — протилежні, тут поле ослабляється. Тому рухомий провідник зміщується вниз, як це й повинно бути за правилом Флеммінга.

Щодо взаємодії магнітів з круговими струмами і соленоїдами, або цих останніх один з одним, то вона визначається за законом взаємодії магнітних полюсів, бо кожний круговий струм або соленоїд, що обтікається струмом, подібний до магніта (§ 80).

**83. Взаємодія струмів.** Кожний прямолінійний струм утворює навколо себе магнітне поле, тому між двома прямолінійними провідниками з струмами повинна бути взаємодія.

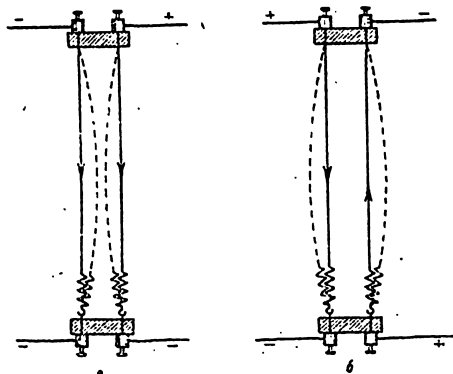


Рис. 100.

Зліва — струми, однаково направлені, притягуються;  
справа — струми, протилежно направлені, відштовхуються.

Щоб вивчити взаємодію паралельних струмів, треба підвищити на близькій віддалі один від одного два гнучких легких провідники і пускати через них струми один раз в однаковому, другий раз — у протилежних напрямках (рис. 100).

Спроби показують, що *струми, однаково направлені, притягуються, протилежно направлені — відштовхуються.*

Якщо рухомі провідники стоять під кутом один до одного, то при пропусканні по них струму вони встановлюються так, щоб струми стали паралельними і однаково направленими.

Цю взаємодію можна пояснити з точки зору натягів і тисків в силових лініях; для цього з допомогою опилок утворимо силові лінії двох паралельних струмів. Рисунок 101 і 102 дають такі поля для обох випадків. З рисунку 101 видно, що обидва струми охоплюються спільними силовими лініями. Ці силові лінії намагаються скоротитися в довжину і при своєму скороченні захоплюють і провідники, зближаючи їх.

Між струмами, протилежно направленими, магнітні силові лінії мають однакові напрями (рис. 102); боковий тиск уперек силовій лінії відштовхує їх один від одного і віддаляє провідники.

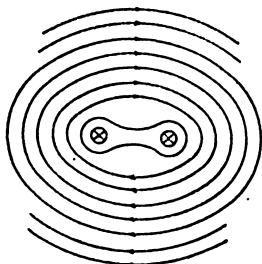


Рис. 101. Магнітні силові лінії поля, утвореного двома паралельними однако направленими струмами (значок  $\otimes$  показує, що струми йдуть від читача).

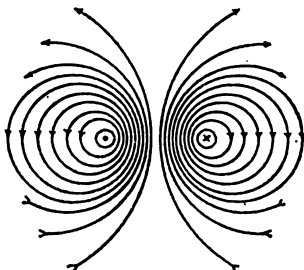


Рис. 102. Магнітні силові лінії поля, утвореного двома паралельними протилежно направленими струмами (значок  $\odot$  показує, що струм іде в напрямі до читача).

**84. Гіпотеза Ампера про походження магнетизму.** Вивчення магнітної дії струму встановило два основних твердження: *поперше, проходження електричного струму завжди супроводиться виникненням магнітного поля навколо струму; подруге, магнітне поле струму, який іде по котушці (соленоїду), має розміщення силових ліній, однакове з полем прямого магніта.*



Ампер<sup>1</sup> (1775 — 1836).

Це відтворення з допомогою електричного струму магнітних явищ, відомих до того часу тільки для постійного магніта, привело до нової гіпотези про походження магнетизму.

Спираючись на магнітну дію струму і відтворення з допомогою струму властивостей постійних магнітів, великий французький фізик Ампер (1775 — 1836) висловив у 1822 р. гіпотезу, що *всьяке магнітне поле має електричне походження.*

Через те що при розломі магніта на будьякі малі частинки кожна частинка являє собою повний магніт з двома полюсами,

<sup>1</sup> Ампер Андре народився в Ліоні у Франції. З 1807 р. — професор спочатку в Бурге, потім у Паризькій політехнічній школі. Ампер дав правило плавця для визначення напрямку відхилення магнітної стрілки під впливом елек-

то на цій підставі магнетизм можна вважати молекулярною властивістю: кожна молекула тіла є магнітом з двома різнойменними полюсами на двох протилежних сторонах. За гіпотезою Ампера, магнетизм молекули пояснюється тим, що молекула обтікається молекулярним електричним струмом.

При намагнічуванні тіла його молекулярні струми, повертаючись, встановлюються в якомусь певному напрямі (рис. 103), а саме так, що при погляді на північний полюс магніта (рис. 104) всі молекулярні струми видні як такі, що йдуть проти стрілки годинника, при погляді на південний — за стрілкою годинника.

Наука ХХ століття, яка розкрила будову атома з позитивно зарядженого ядра і електронів, що обертаються по орбітах навколо центрального ядра, може дати пояснення виникненню молекулярних струмів. Електрон, що рухається по орбіті, як і всякий рухомий заряд, також утворює навколо себе магнітне поле. Рух цих орбітальних електронів і відповідає молекулярним струмам.

При такому поясненні виникає нове питання. Оберткові електрони в атомі кожного хімічного елемента. Чому ж магнітні властивості приписуються тільки тим небагатьом речовинам, що перелічені в § 70? Ще в 1846 — 1847 рр. Фарадей відкрив, що магнітне поле діє на всі без винятку тіла, але проявляється ця дія по-різному і в різній мірі. Ця відмінність пояснюється тим, що магнітні поля окремих електронів, які входять до складу молекули складної речовини, при інших розміщеннях орбіт можуть взаємно немов би знищуватися, при інших — дають якесь результуюче поле.

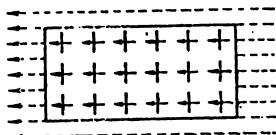
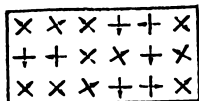


Рис. 103. Розміщення молекулярних струмів у немагнітному і намагніченому тілах.

Стрілки показують напрям силових ліній кругових струмів, зображених в перерізі відлісками.



Рис. 104. Схема амперових струмів у магніті.

тричного струму, зробив „астиатичну стрілку“ для гальванометра, на яку не впливає земний магнетизм; він вивчив експериментально взаємодію струмів і розробив теорію цієї взаємодії. Він вивчив магнітні властивості струму, що проходить по спіральному провіднику, названому ним соленоїдом; нарешті, він дав теорію магнетизму, що назавжди поклала край попередній роздільності вчень про електрику і магнетизм, і об'єднала в одну ціле ці дві сфери фізичних явищ.

Майстерність, точність робіт Ампера, струнке сполучення теорії і досліду, поєднання наукових занять в галузі фізики з вивченням філософії справили таке враження на фізиків, що Ампера назвали „Ньютоном електрики“.



Отже, магнетизм є невід'ємна властивість всякого рухомого заряду. Електричний струм і магнітне поле—це два прояви єдиного процесу—руху електричних зарядів.

**Вправа 12.**

1. Застосуйте „правило лівої руки“ до взаємодії двох паралельних струмів, вважаючи, що кожний знаходиться в полі другого, тобто через нього проходять силові лінії другого, і поясніть напрям руху.

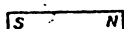


Рис. 105.

2. На схід або на захід від магнітного меридіана міг би бути відхилений земним магнетизмом прямокутний струм, що перпендикулярний до силових ліній і йде зверху вниз?

3. Як могла б установитися під впливом земного магнетизму легка рухома прямокутна рама, що обтікається струмом (який був би кут площини рами з площиною магнітного меридіана)? У східній чи західній бітці рами ішов би низхідний струм?

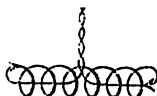
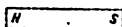


Рис. 106.

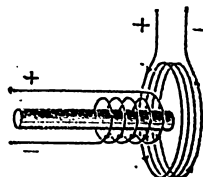


Рис. 107.

4. Яке положення відносно магніта займе при пропусканні струму рухомих провідник рисунка 105?

5. Як зміниться положення рухомого соленоїда (рис. 106) відносно магніта при проходженні струму по соленоїду? Що станеться, якщо змінити на протилежний напрям струму? напрям магніта? Модель якої машини дає ця установка?

6. Який рух дістане котушка (рис. 107) відносно електромагніта при даних напрямках струму? при зміні напрямку обох струмів? при зміні одного?

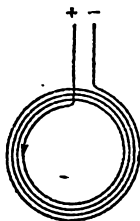


Рис. 108.

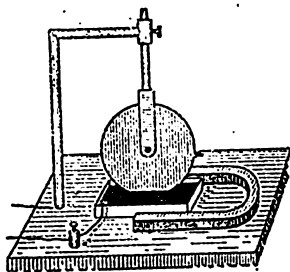


Рис. 109.

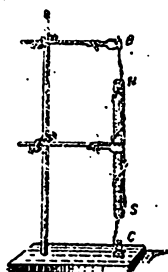


Рис. 109а.

7. Яке взаємне положення займуть дві котушки, по яких йде струм напрямку, показано на рисунку 108? Як зміниться положення, якщо зміниться напрям струму в лівій котушці? в правій? в обох?

8. Чому металічне колесо, опущене нижнім кінцем чашку з ртуттю і вміщене між полюсами підковоподібного магніта (рис. 109), починає обертатися, якщо через ртуть і колесо пропущено електричний струм?

9. Чому гнучкий провідник, по якому йде струм, охоплює спіраллю вміщену коло нього прямий магніт, як показано на рисунку 109а? В якому напрямі йде струм по провіднику (проробить спробу)?

10. Який рух дістав би вертикально підвішений гнучкий провідник з струмом (поперерня задача), якби до нього піднести справа горизонтально розміщений магніт?

Зробити рисунки, задавши різні напрями струму і різні розміщення полюсів.

85. Електричні вимірні прилади. На взаємодії магнітів і струмів заснована будова приладів для вимірювання величини струму і напруги. Якщо укріпити нерухомо (рис. 110) підковоподібний магніт і між його полюсами вмістити на вістрях вісь  $C_1C_2$  легкої рамки з намотаним на неї ізолюваним дротом  $B$ , то при пропусканні струму по дроту рамка повертатиметься у магнітному полі в наслідок розглянутих вище взаємодій.

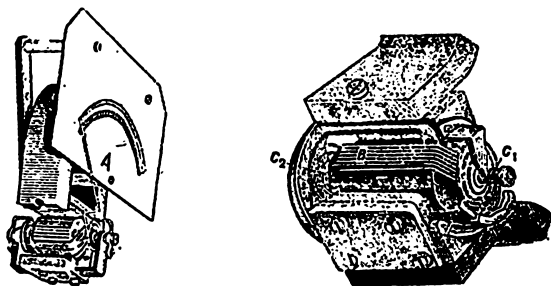


Рис. 110. Рухома частина амперметра.

Тонкі спіральні пружини, скріплені з рамкою, протидіють цьому поверненню і намагаються вернути її в початкове положення.

Тому кут повороту рамки залежить від величини струму і пружності пружини. Кут повороту рамки збільшується із збільшенням величини струму. Напрямок обертання залежить від напрямку струму. З віссю рамки скріплюється легка стрілка, яка своїм переміщенням по шкалі показує кут повороту рамки. Прилад називається гальванометром.

Якщо прилад попередньо проградуєвано і поділки на шкалі нанесені в амперах, то прилад дістає назву амперметра, якщо у вольтах — вольтметра.

У шкільному демонструвальному приладі Де пре-Д'Арсона вала сполучені звичайно амперметр і вольтметр (рис. 111)<sup>1</sup>.

Амперметри завжди вмикаються в коло послідовно і кон-

<sup>1</sup> При користуванні приладом, зображеним на рисунку, один кінець кола прилучають до клем, відміченої знаком  $+$ , а другий — до однієї з інших клем, залежно від того, чи хочуть користуватись приладом, як гальванометром, амперметром чи вольтметром.

струються з дуже малим опором, щоб амперметр забрав якнайменше енергії.

Знаючи величину струму  $I$  і опір  $R$ , можна розрахувати для кожної величини струму напругу на затискачах прилада  $U = IR$  і нанести на шкалі відповідні значення напруги у вольтах; такий прилад називається вольтметром. Через те що напруга вимірюється на кінцях провідника, то вольтметр вмикається паралельно провіднику між його кінцями. Щоб вольтметри забирали якнайменше енергії, їх роблять з дуже великим опором (вправа 7, задача 10).

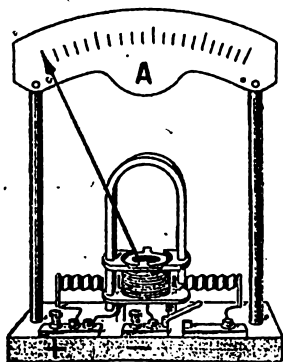


Рис. 111. Амперметр з шунтом.

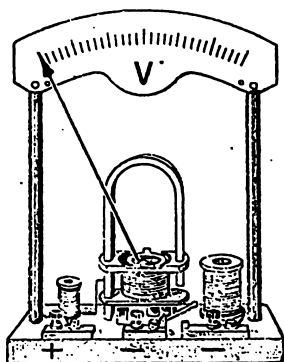


Рис. 112. Вольтметр.

Для нанесення поділок на шкалу градуйованій амперметр вмикається в одне коло послідовно з ванною з розчином срібної солі. За кількістю срібла, що відклалося на катоді, і за часом проходження струму можна обчислити величину струму. Обчислені для різних показів стрілки величини струму в 1, 2, 3, ... ампера наносяться на шкалу. При технічному виготовленні амперметрів вони вмикаються послідовно в одне коло з приладом, градуйованим описаним вище способом, і розмічаються за його доказами.

Кожний прилад збудований для певних граничних значень вимірюваної величини.

Якщо через амперметр пропускати сильніший струм, ніж той, для якого цей прилад призначений, або, якщо до вольтметра прикласти напругу, яка перевищує напругу, граничну для цього вольтметра, то прилади можуть зіпсуватися. Але одним і тим же амперметром можна вимірювати струми в 10, 100 і взагалі в  $n$  раз більше, якщо до затискачів амперметра, паралельно йому ввімкнути опір (шунт), величина якого становить  $\frac{1}{n}$ ,  $\frac{1}{100}$ ,  $\frac{1}{1000}$  і взагалі  $\frac{1}{n-1}$  опору амперметра (вправа 7, задачі 6 і 7).

Щоб розмітити шкалу вольтметра на поділки різної ціни<sup>1</sup>, треба прилучити при градуванні додаткові опори послідовно до опору вольтметра (рис. 112).

Електромагнітні амперметри і вольтметри складаються з котушки, по якій пускається вимірюваний струм, і стрижня з м'якого заліза, вміщеного на пружині перед отвором котушки. При проходженні через котушку струму будьякого напрямку стрижень втягується в котушку на більшу чи меншу глибину, залежно від величини струму (рис. 113). Нанесення поділок на шкалу прилада в амперах, вольтгах або їх частинах робиться так само, як і для приладів з постійним магнітом та рухомою рамкою.

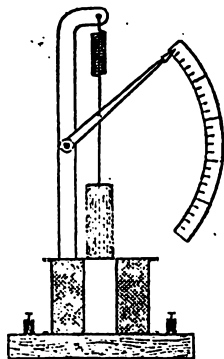


Рис. 113. Електромагнітний амперметр.

### ЗАПИТАННЯ.

1. Що називається магнітним полем?
2. Що показує силова лінія?
3. Що береться за напрям силової лінії?
4. Які форма і напрям силових ліній у полі прямого і підковоподібного магніта?
5. Замкнені чи розімкнені силові лінії поля магніта?
6. Які місця магніта називаються його полюсами?
7. Що називається кутом схилення? магнітним меридіаном? Які бувають схилення?
8. Що називається кутом нахилення? магнітним екватором? Які бувають нахилення?
9. Чим пояснюється схилення й нахилення?
10. Яка форма і напрям силових ліній магнітного поля прямолінійного, кругового і соленоїдального струмів?
11. Чи є магнітні полюси на силовій лінії струму?
12. Що називається електромагнітом?
13. Описати будову електромагніта і положення полюсів залежно від напрямку струму.
14. Указати застосування електромагніта.
15. Формулювати правило Флеммінга для дії магнітного поля на рухомий струм.
16. У чому полягає взаємодія струмів?
17. Яка будова амперметрів і вольтметрів?
18. Як змикаються в коло амперметри і вольтметри?

<sup>1</sup> Наприклад, так, щоб кожна поділка відповідала 1 вольтові або 5 вольтам або 10 вольтам.

#### IV. ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ ЧЕРЕЗ РІДИНИ Й ГАЗИ.

86. Електричний струм через рідини. Електричний струм у металах (і вугіллі) утворюється електронами, що рухаються між молекулами; самі ж молекули і частинки речовини лишаються нерухомими. Такі провідники називаються провідниками першого роду; їх провідність називається електронною.

У розчинах кислот і солей і в газах електрика переміщується разом з частинками речовини.

Рідкими провідниками є ті розчини солей кислот і лугів або розтоплені солі, які при розчиненні або розтопленні розпадаються на іони.

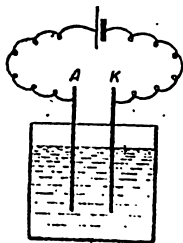


Рис. 114. Електролітична ванна.

Якщо брати окремо розчинник і тверду сіль, то кожне з цих тіл не проводить струму. Але якщо в посудину з дистильованою водою всипати солі, то при ввімкненні такого розчину в коло можна виявити проходження струму. Як було в'яяснено в § 31, молекули солі, кислоти і лугу при розчиненні розпадаються на дві частини, на два іони, з яких один завжди водень або метал, другий — кислотний або водний залишок.

При рознаді водень або метал втрачає частину своїх електронів і стає зарядженим позитивно; кислотний або водний залишок дістає надмір електронів і стає зарядженим негативно.

Для ввімкнення розчину в коло його наливають у посудину, що називається електролітичною ванною, і в нього опускають кінці кола. Кінець провода, або електрод, сполучений з позитивним полюсом джерела, називається анодом, сполучений з негативним — катодом.

Якщо ввімкнути розчин в коло електричного струму, опустивши в посудину з розчином електроди (рис. 114), то електрони джерела струму, що скупчилися з надміром на катоді, будуть відштовхувати негативні іони до анода і притягувати до катода позитивні іони.

Негативні іони, що прийшли до анода і називаються через це аніонами, віддають свої зайві електрони анодові, а через нього і через сполучний провідник — позитивному полюсові джерела, поповнюючи на ньому недостачу електронів; позитивні іони, що прийшли до катода і тому називаються катіонами, одержують недостаючі їм електрони з надміру їх на катоді. Іони, що стали тепер, таким чином, нейтральними, виділяються у вигляді частинок<sup>1</sup> речовини на електродах і при тому тільки на електродах, а не всередині рідини. Так устано-влюється в колі неперервний струм: електрони негативного полюса джерела приходять до катода, на ньому вони нейтралізують

<sup>1</sup> Тобто у вигляді атомів або груп атомів.

катіони, відштовхуючи в свою чергу у відповідній кількості аніони до анода; електронні аніонів переходять на анод і по сполучному дроту — на позитивний полюс джерела; так устано-влюється по зовнішньому колу *переміщення електронів* від негативного полюса джерела струму до позитивного. При цьому *через рідину електрика переноситься разом з частинками речовини*.

Перенесення електрики частинками речовини електроліту називається іонною провідністю.

Тільки ті розчини проводять електрику, які містять у собі іони<sup>1</sup>. Такі рідкі провідники називаються провідниками дру-гого роду.

Виділення іонів на електро-дах називається електролі-зом<sup>2</sup>; самі провідники друго-го роду називаються електро-літами.

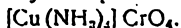
Основною умовою електро-лізу є розпад молекули при розчиненні на два іони і ви-ділення їх як первинних про-дуктів розпаду на електродах при проходженні струму. Так,

при проходженні струму через розчин хлоридної кислоти HCl на катоді виділяється водень H, на аноді Cl.

Рух іонів можна виявити на такій спробі. Прямокутний кусок фільтрувального паперу змочується розчином натрій-сульфату і фенол-фталейну і кладеться на скляну пластинку. Упоперек па-перу поміщається біла нитка, змочена розчином їдкого натру.

Якщо на рівних віддальх від нитки притиснути до паперу електроди (рис. 115), то при вмиканні струму іони гідроксилу (OH) починають рухатися до анода, створюючи на шляху мал-нове забарвлення.

Двосторонній рух можна виявити, якщо папір змочити в роз-чині кухонної солі, а цитку — в розчині солі:



Рух іонів характеризується їх рухомістю. Рухомість іонів ви-мірюється швидкістю руху їх в електричному полі при спаданні потенціала в 1 вольт на 1 см.

Рухомість іонів при 18° в  $\frac{\text{см}}{\text{сек}} : \frac{\text{вольт}}{\text{см}}$ .

Гідроксоній H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> . . . . .	33 · 10 <sup>-4</sup>
Натрій Na <sup>+</sup> . . . . .	4,6 · 10 <sup>-4</sup>
Залізо (двовалентне) Fe <sup>2+</sup> . . . . .	4,8 · 10 <sup>-4</sup>
Гідроксил OH <sup>-</sup> . . . . .	18,2 · 10 <sup>-4</sup>
Хлор Cl <sup>-</sup> . . . . .	6,85 · 10 <sup>-4</sup>
Кислотний залишок SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> . . . . .	7,6 · 10 <sup>-4</sup>

<sup>1</sup> Розчини, що не розпадаю-ться на іони, не проводять електрики; таким є, наприклад, розчин цукру в дистильованій воді.

<sup>2</sup> По-грецькому *лізіс* означає роз'єднання.

87. Вторинні реакції при електролізі. В більшості випадків іони в момент виділення на електродах вступають в хімічну взаємодію або з електродами або з навколишньою рідиною. Такі взаємодії іонів називаються вторинними реакціями.

Вторинні реакції можуть дати на електродах продукти, що дуже відрізняються від первинних іонів.

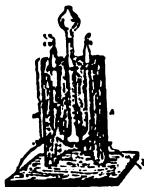
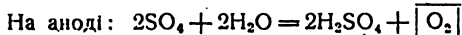
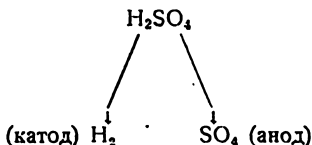


Рис. 116. Прилад для електролізу.

Приклади вторинних реакцій.

1. Електроліз розчину сульфатної кислоти  $H_2SO_4$  (рис. 116) відбувається так<sup>1</sup>:

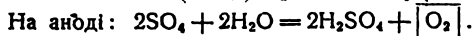
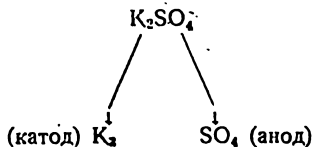


На катоді: з двох молекул сульфатної кислоти виділяється



Сульфатна кислота відновлюється, а продуктами розпаду є водень і кисень у тому співвідношенні, в якому вони входять до складу молекули води. Отже, в результаті вторинної реакції маємо розклад води. Проте електролізу води, як первинної дії струму, не буває, бо дистильована вода — непровідник.

2. Електроліз розчину натрій-сульфату або калій-сульфату ( $K_2SO_4$ ):



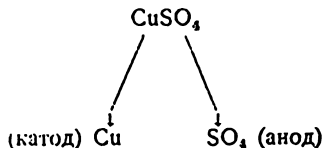
Остаточні продукти: сульфатна кислота, луг, водень і кисень; два останніх — у відношеннях, в яких вони входять до складу молекули води.

Величезні запаси глауберової солі ( $Na_2SO_4$ ) в Кара-Богаз-Гольській затоці Каспійського моря можна, отже, перетворити в цінні продукти: сульфатну кислоту і їдкий натр.

Молекула  $SO_4$  нестійка, віддає кисень O і перетворюється в молекулу  $SO_2$  сульфат-ангідриду. Ця остання утворює з водою сульфатну кислоту.

<sup>1</sup> Рівняння написано спрощено.

3. Електроліз розчину мідного купоросу ( $\text{CuSO}_4$ ); електроди мідні:



На аноді:  $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{SO}_4 = 2\text{H}_2\text{SO}_4 + \boxed{\text{O}_2}$ .

На катоді: відкладається  $\boxed{2\text{Cu}}$ .

Якщо анод зроблено з міді, то мідь розчиняється в сульфатній кислоті, що утворюється навколо анода.

В результаті мідь анода переходить у розчин, на катоді виділяється така ж кількість міді; міцність розчину залишається без зміни.

На цій останній реакції ґрунтуються технічні застосування електролізу: гальваностегія — покриття одного металу іншим; гальванопластика — одержання металічних відбитків з рельєфних предметів; електрометалургія — одержання чистих металів.

88. *Лабораторна робота 3.* Вивчення законів електролізу.

Прилади: 1) два акумулятори; 2) ванна; 3) пара мідних і пара цинкових електродів; 4) амперметр; 5) рубильник; 6) реостат з рухомим контактом; 7) вага і важки; 8) проводи; 9) спиртовка; 10) розчини різних солей; 11) годинник з секундною стрілкою (10 і 11 — спільні для всього класу).

1. Знайти залежність кількості виділеної при електролізі речовини від часу проходження струму.

Хід роботи. 1. Зважте обидва мідних електроди (якщо немає часу, то тільки катод).

2. Налийте у ванну розчину мідного купоросу.

3. Складіть коло: акумулятор, амперметр, реостат, рубильник, електроди ванни (якщо зважена одна пластинка, її треба вмістити на місце катода); замкнвши струм, запам'ятайте час.

4. Коли мине час  $t_1$ , розімкніть струм, вийміть електроди з розчину; висушіть їх у струмені теплого повітря над полум'ям пальника; зважте на вазі і запишіть, наскільки збільшилася маса катода і наскільки зменшилася маса анода; середне з цих чисел вважайте за кількість виділеної міді  $m_1$  міліграмів.

5. Склавши коло, як і раніше, установіть з допомогою реостата ту саму величину струму, що і в спробі 3, і пропустіть струм протягом іншого часу  $t_2$ .

6. Так само, як і раніш, обчисліть кількість виділеної за час  $t_2$  міді  $m_2$  міліграмів.

7. Знайдіть відношення  $\frac{m_2}{m_1}$  і  $\frac{t_2}{t_1}$  і порівняйте їх між собою. Який можна зробити висновок із спроби?



Таблиця для запису.

Маса до замикання струму		Маса після розмикання струму		Зміна маси		Кількість виділеної речовини в міліграмах $m$	Час спроби $t$ секунд	Величина струму $I$	$\frac{t_2}{t_1}$	$\frac{m_2}{m_1}$
анод	катод	анод	катод	анод	катод					

2. Знайти залежність кількості виділеної речовини від величини струму.

3. Порівняти відношення кількостей виділених металів при однакових умовах з відношенням їх хімічних еквівалентів<sup>1</sup>.

План і хід роботи по другому і третьому завданнях складіть самостійно.

89. Закони Фарадея для електролізу. Хоча вперше електроліз водного розчину кислоти струмом було зроблено в 1800 р., але через складність вторинних реакцій тільки в 1833 р. удалось Фарадеєві вивести із своїх дослідів такі закони електролізу.

**Перший закон.** *Кількість виділеної при електролізі речовини прямо пропорціональна величині струму і часові його проходження* (тобто пропорціональна числу кулонів, що пройшли через електроліт).

*Кількість речовини, виділеної одним кулоном, називається електрохімічним еквівалентом* даної речовини.

Якщо позначити електрохімічний еквівалент речовини через  $k$   $\frac{\text{міліграмів}}{\text{кулон}}$ , величину струму — через  $I$  амперів, час проходження — через  $t$  секунд, вагову кількість виділеної речовини — через  $m$  міліграмів, то перший закон може бути виражений співвідношенням:

$$m = Kit.$$

(XIXa)

**Другий закон.** *Електрохімічні еквіваленти речовин прямо пропорціональні їх хімічним еквівалентам.*

Другий закон установлює, що відношення електрохімічного еквівалента  $K$  до хімічного еквівалента  $M$  тієї самої речовини є величина стала; це відношення  $= 0,01036$  (див. таблицю); звідси  $\frac{K}{M} = 0,01036$ ;  $K = 0,01036 \cdot M$ , або  $K = 0,01036 \frac{A}{n}$ , де  $A$  — атомна вага,  $n$  — валентність, а  $\frac{A}{n}$  — хімічний еквівалент речовини.

<sup>1</sup> Хімічним еквівалентом називається частка від ділення атомної ваги речовини на її валентність; валентність елемента дорівнює числу атомів водню, яке замінюється даним елементом у хімічних сполуках.

Обидва закони можна об'єднати формулою:

$$m = 0,01036 \cdot \frac{A}{n} \cdot It \text{ міліграмів.}$$

(XIXб)

Обидва закони можна об'єднати в такому словесному формулюванні.

**Кількість виділеної при електролізі речовини у міліграмах прямо пропорційна хімічному еквівалентові речовини і числу кулонів, що пройшли через електрод.**

Ці закони треба розуміти так, що при проходженні струму через розчин солі срібло-нітрату кожен кулон виділить 1,118 мг срібла; при проходженні через хлорну і хлористу сіль при всякій основі кулон виділить 0,3672 мг хлору; при проходженні через ті солі заліза, де воно двовалентне, кулон виділяє 0,2895 мг заліза, а з тих солей, де залізо тривалентне, кулон виділяє у півтора раза меншу кількість, тобто 0,1930 мг.

На підставі хімічної дії струму можна дати визначення ампера незалежно від кулона, як це зроблено в міжнародному означенні. *Міжнародний ампер є така величина постійного струму в колі, при якій з розчину солі срібла виділяється на катоді 1,118 мг срібла за 1 секунду.*

90. Числове значення заряду електрона в кулонах. На підставі формули закону Фарадея можна розрахувати, скільки потрібно буде кулонів, щоб виділити грам-еквівалент будь-якої речовини.

Грам-еквівалентом речовини називається число грамів, яке дорівнює хімічному еквівалентові цієї речовини.

Грам-еквівалент речовини виразиться числом грамів, яке знайдемо в таблиці в стовпці з заголовком „Хімічний еквівалент“, тобто числом  $\frac{A}{n}$  грамів.

Якщо в формулу (XIXб) вставити  $m = \frac{A}{n}$  (грамів) =  $1000 \frac{A}{n}$  (міліграмів), то матимемо:

$$1000 \frac{A}{n} = 0,01036 \cdot \frac{A}{n} \cdot It,$$

звідки

$$It = \frac{1000}{0,01036} = 96\,500 \text{ кулонів}^1.$$

<sup>1</sup> З точністю до сотень. Це число можна обчислити для всякої речовини і за першою формулою  $m = KIt$ , звідки  $It = \frac{m}{K}$  і  $m = \frac{A}{n}$ .



у всіх інших відомих явищах), дорівнює  $16 \cdot 10^{-20}$  кулонів. В системі CGSE елементарний заряд виражається числом  $4,8 \cdot 10^{-10}$ .

В усіх явищах електрики бере участь або один елементарний заряд або кратне число їх.

Найменша кількість негативної електрики називається електроном. Найменша кількість позитивної електрики величиною дорівнює зарядові електрона.

Найменшу кількість позитивної електрики мають протони, а також позитрони — елементарні частинки, що відрізняються від електрона тільки знаком заряду.

З усього викладеного вище можна бачити, що іоном називається атом або сукупність атомів речовини, які мають один або кілька елементарних зарядів (позитивного або негативного знака).

Так, іон водню є атом водню, що несе позитивну електрику, кількістю рівну зарядові електрона (тобто атом позбавлений свого електрона); іон міді при електролізі мідного купоросу є атом міді з позитивною електрикою, що дорівнює по абсолютній величині заряду двох електронів; іон хлору — сполука атома хлору з електроном; іон кислотного залишку ( $\text{SO}_4$ ) — сполука групи атомів  $\text{SO}_4$  з двома електронами і т. д.

### Іправа 13.

1. Скільки нікелю виділить із розчину нікель - сульфату струм у 2 ампера протягом 1 год. 40 хвилин? Відп. 3,618 г.

2. Яка величина струму потрібна, щоб при розкладі розчину сульфатної кислоти виділити за одну годину 1 л водню (при нормальних умовах)? Скільки грамів води при цьому буде розкладено? Відп. 2,39 А.

3. При градуванні амперметра знайдено, що струм виділив за 50 хв. 0,5 г срібла. Знайти величину струму.

4. Скільки часу треба пропускати струм в 0,8 ампера, щоб на катоді розміром в  $1 \text{ дм}^2$  виділився з мідного купоросу шар міді в 0,6 мм завтовшки? Відп.  $\approx 56$  год.

5. Через ванну з 10-процентним розчином мідного купоросу і мідними пластинками розміром  $8 \text{ см} \times 10 \text{ см}$  пушено струм від акумулятора ( $\text{ЕРС} = 2\text{В}$ ). На якій віддалі треба поставити пластини, щоб за 4 години мати на катоді шар міді в  $0,1 \text{ мм}$ ? Внутрішній опір акумулятора і опір проводів до уваги не брати. Відп.  $\approx 3 \text{ см}$ .

6. В коло ввімкнено амперметр і ванну з розчином мідного купоросу. Амперметр показував 4 ампера, на катоді ванни за 100 сек. відкладлось 123 мг міді. Перевірити показ амперметра.

7. Доки триватиме процес електролізу мідного купоросу, якщо електроди взято вугільні? мідні?

8. На мідному електролітичному заводі поставлено 400 ванн. В кожній ванні 20 катодів. Катоди у ванні сполучені паралельно, ванни — послідовно. Розмір катодної пластинки  $1000 \text{ мм} \times 300 \text{ мм}$ . Густина<sup>1</sup> струму дорівнює  $200 \text{ А/м}^2$ . Знайти випуск міді за добу. Відп.  $\approx 36 \text{ т}$ .

9. Яка густина струму проходить через ванну мідного електролітичного заводу, якщо кожний катод дає за добу 8 кг чистої міді при розмірі в  $1000 \text{ мм} \times 900 \text{ мм}$ ? Відп.  $316 \text{ А/м}^2$ .

<sup>1</sup> Густина струму вимірюється величиною струму, яка припадає на одиницю площі поперечного перерізу.

Якщо переріз позначити через  $S$ , то густина струму дорівнює  $\frac{I}{S}$ .

10. Скільки енергії витрачається на тонну виділеної за добу міді в задачі 8, якщо напруга на наших дорівнює 110 вольтам? *Відп.  $\approx 33$  квт-г.*

11. Скільки електронів за секунду проходить через переріз кола, якщо величина струму дорівнює 1 амперові?

12. Величина струму в 2 ампера проходить протягом 10 хвилин через розчин сульфатної кислоти. Знайти об'єм кисню і водню, що утворилися.

$$\text{Густина } H_2 = 0,00009 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}; \text{ густина } O_2 = 0,00143 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}.$$

*Відп.* Для  $H_2$  близько 140 см<sup>3</sup>.

13. Скільки потрібно часу, щоб при величині струму в 1 ампер покрити поверхню металічної пластинки в 100 см<sup>2</sup> шаром срібла в 0,01 см товщини?

$$\text{Густина срібла } 10,5 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}.$$

*Відп.* 2 год. 36,5 хв.

91. Поляризація елементів. Якщо в коло гальванічного елемента Вольта ввімкнути амперметр, то можна помітити поступове зняття величини струму. Це зняття зв'язане з появою

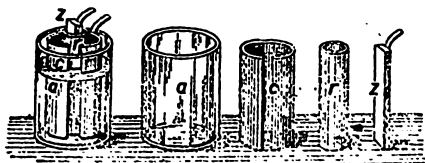


Рис. 117. Елемент Данієля.

па позитивному полюсі бульбашок водню, що утворюються при електролізі сульфатної кислоти<sup>1</sup>. Шар водню — поганий провідник, він збільшує внутрішній опір елемента, через що зменшується величина струму в колі. З другого боку, новоутворений елемент з електродами — мідь, вкрита воднем, — цинк — дає електрорушійну силу, що протилежна ЕРС початкового елемента і зменшує її до 0,77 вольт.

Утворення ЕРС, протилежно направленої ЕРС елемента, внаслідок покриття позитивного полюса бульбашками водню, називається поляризацією елемента. ЕРС, що виникає, називається ЕРС поляризації.

Усування поляризації називається деполаризацією.

92. Елементи, що не поляризуються. 1. Елемент Данієля. Цей елемент складається (рис. 117) із скляної циліндричної банки *a*, в яку опускається мідний циліндр *c*; в нього вставляється посудина з пористої глини *r*; у цю посудину вміщується шпик *z*; у пористу посудину наливається слабкий розчин сульфатної кислоти, в скляну — розчин мідного купоросу<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> І тут іон водню іде по струму; тільки треба згадати, що всередині елемента струм іде від негативного полюса до позитивного.

<sup>2</sup> Іноді цинк робиться у вигляді циліндра і вміщується з сульфатною кислотою в скляну посудину, тоді мідь і мідний купорос знаходяться у пористій посудині.

Так само, як і в елементі Вольта, позитивні іони цинку переходять у розчин, утворюючи цинк-сульфат. Іони водню через пористу перегородку переходять у скляну посудину, витісняють позитивні іони міді з мідного купоросу, займають їх місце і відновлюють сульфатну кислоту. Іони міді виділяються на мідній пластинці, віддаючи їй позитивні заряди (точніше — запозичуючи від неї електрони) і осідаючи у вигляді нейтрального мідного шару на мідній же пластинці. Отже, водень, що спричиняє поляризацію, знаходиться в зв'язаному стані; поверхні металічних пластинок лишаються незмінними, ЕРС елемента залишається сталою. ЕРС елемента Данієля дорівнює 1,1 вольту:

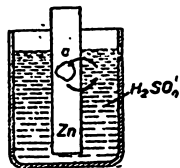


Рис. 118. Паразитний струм.

При розгляді елемента Вольта відзначалося, що розчинення цинку в кислоті може відбуватися тільки при проходженні струму. Але так стоїть справа тільки тоді, коли цинк хімічно чистий. Якщо в цинк вкраплені частинки сторонніх металів *a*, тоді в таких місцях утворюється місцевий елемент: цинк, метал, сульфатна кислота; в такому замкненому колі виникає місцевий паразитний струм (рис. 118), і цинк розчиняється, хоча б полюси самого елемента не були замкнені колом. Для усунення паразитних струмів цинк амальгамується, тобто натирається ртуттю, через

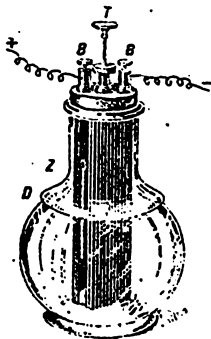


Рис. 119: Елемент Грене.

що утворюється розчин цинку в ртуті, який покриває цинк у вигляді амальгами, а домішки відокремлюються від кислоти амальгамою.

В усіх металічних спорудах, що складаються з сполучення різних металів, при покритті їх вологою плівкою з повітря або у вологому ґрунті, відбувається електроліз, що руйнує метали. Таке руйнування металів, спричинене електрохімічними процесами, називається корозією. При поширенні в соціалістичній техніці металічних споруд корозія є надто шкідливим явищем. Техніка знаходить способи боротьби з нею.

2. Елемент Грене. Деполяризатором служить другий електроліт, що наливається в одну посудину з першим. Полюсами елемента Грене (рис. 119) служать цинк і вугілля (дві вугільні пластинки, сполучені разом): Рідина складається з суміші розчину сульфатної кислоти і розчину калій-пірохромату<sup>1</sup>. Процес і тут полягає в розчиненні цинку; цинкова пластинка є негативним полюсом; водень, що виділяється на вугіллі, окисдується

<sup>1</sup> Примірний склад: 100 частин води, 16 частин калій-пірохромату, 37 частин сульфатної кислоти.

у воду за рахунок кисню калій-пірохромату ( $K_2Cr_2O_7$ ), що дуже багатий на кисень і переходить в наслідок реакції з воднем в сполуки, менш багаті на кисень. Вугільна пластинка — позитивний полюс. Електрорушійна сила елемента Грене дорівнює 2 вольтам.

3. *Елемент Лекланше.* Деполяризатором служить тверда речовина — манган-пероксид ( $MnO_2$ ); суміш  $MnO_2$  з вугільним порошком пресується у вигляді пластинок (агломерат) і скріплюється з вугіллям. Елемент складається з цинкової пластинки (негативний полюс), з вугільної пластинки, скріпленої з агломе-

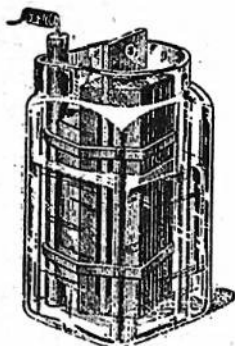


Рис. 120. Елемент Лекланше.



Рис. 121. Сухий елемент.

ратом (позитивний полюс), і 20-процентного розчину нашатиру  $NH_4Cl$  (рис. 120).

Електрохімічний процес полягає, як і в елементі Вольта (§ 32), в розчиненні цинку<sup>1</sup> і виділенні на вугіллі водню.

В момент виділення на вугільній пластинці водень окислюється в воду за рахунок кисню манган-пероксиду, який відновлюється в сполуку, менш багату на кисень. Отже, манган-пероксид є деполяризатором. Через те що деполяризатор твердий, то деполяризація відбувається повільно; при тривалій дії елемента його електрорушійна сила все ж змінюється. Він переважно застосовується при короткочасному користуванні (для електричних дзвоників). Електрорушійна сила елемента Лекланше дорівнює 1,5 вольтів.

Елементи Лекланше часто вживаються у вигляді сухих елементів. В сухих елементах розчином нашатиру просякають якунебудь речовину, що дуже вбирає і удержує вологу, наприклад тирсу. Сухий елемент старанно закупорюється (рис. 121). Сухі елементи широко застосовуються у кишенькових ліхтарях, в проводках електричних дзвоників та інших сигналізаторів, в лабораторних роботах і т. д.

<sup>1</sup> Утворюється сполука  $Zn(NH_4)_2Cl_2$ .

93. Поляризація електродів. ЕРС поляризації, розглянута для гальванічного елемента, виникає також і при електролізі всяких електролітів при умові, що електроди змінюються (наприклад, вкриваються сторонніми тілами).

Якщо через прилад, призначений для електролізу сульфатної кислоти (рис. 122), пропускати деякий час струм, потім відімкнути джерело струму і сполучити електроди через гальванометр, то гальванометр покаже існування струму, напрям якого всередині прилада протилежний струмові, що провадив електроліз. Це появився струм поляризації; всередині посудини струм іде від колишнього катода до колишнього анода, а по зовнішньому колу — від анода до катода. Колишня катодна пластинка виявилась покритою воднем, колишня анодна — киснем, і ЕРС поляризації дає струм поляризації, який триває доти, поки водень і кисень не зникнуть з електродів. Електроліз всякого електроліту можливий тільки тоді, коли напруга на затискачах вичини більша ЕРС поляризації.

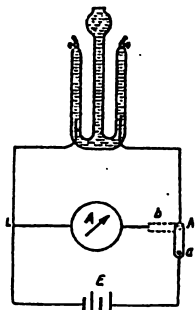


Рис. 122. Дослід, що доводить виникнення струму поляризації.

Отже, описаний вище прилад може у вигляді енергії струму поляризації повертати назад у коло затрачену електричну енергію (за винятком неминучих втрат). На цій підставі прилад цей можна назвати вторинним елементом, або акумулятором (нагромаджувачем енергії).

Найуживаніші два види акумуляторів: кислотні і лужні.

94. Акумулятори. *Кислотний*, або *свинцевий*, акумулятор складається з свинцевих пластин, опущених у 20-процентний розчин сульфатної кислоти (рис. 123).

Пластини електродів являють собою звичайну раму або пластину з ребристою поверхнею

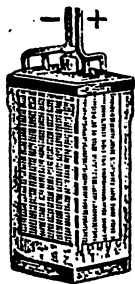


Рис. 123. Кислотний акумулятор.

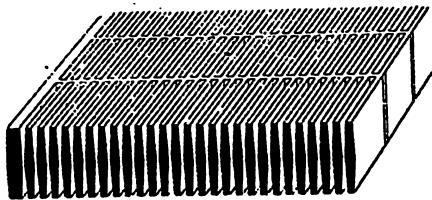


Рис. 123а. Позитивна пластинка акумулятора системи Тюдор.

(рис. 123а), заповнену речовинами, які вступають у реакцію. Такою речовиною на негативному полюсі зарядженого акумулятора є губчастий свинець, що має завдяки губчастості



велику поверхню стикання з рідиною, на позитивному полюсі — пористий шар свинець-пероксиду.

Щоб зарядити після роботи акумулятор, пластини приєднують до протилежних полюсів джерела струму. Відбувається електроліз сульфатної кислоти, при чому на катоді відновлюється воднем металічний свинець, а на аноді кисень, відщеплюючи сульфатну кислоту, утворює свинець-пероксид. Після досить довгого пропускання струму ми матимемо одну пластину чистого свинцю, другу — вкриту свинець-пероксидом, а концентрацію сульфатної кислоти в розчині — збільшеною. При розряджанні акумулятора всі процеси відбуваються в зворотному напрямі, повертаючи у вигляді електричного струму енергію, витрачену при заряджанні.

При заряджанні ЕРС акумулятора швидко відіймається до 2,1 вольт, під кінець доходить до 2,7 вольт. При розряджанні ЕРС швидко спадає з 2,7 до 2 вольтів, довго лишається на цій величині і потім повільно спускається. Нижче 1,85 вольта продовжувати розряджання акумулятора не слід.

При розряджанні нижче цієї межі на електродах утворюється білий шар оксидної солі сульфатної кислоти  $PbSO_4$ , важко розчинної, через що ємність і коефіцієнт корисної дії акумулятора знижуються.

Густина струму не повинна перевищувати 0,5 ампера на 1  $дм^2$  пластини. Від необережного поводження або від дуже сильного розрядного струму (при короткому замиканні) пластини руйнуються, і акумулятор псується. Акумулятори псуються також, якщо їх держати незарядженими.

Більшу міцність щодо сильних розрядних струмів і механічних струсів мають лужні акумулятори, першим винахідником яких був американець Едіссон. В них електролітом є 20-процентний розчин їдкого калі; негативним полюсом — стальна пластина, вкрита сумішшю оксиду заліза і оксиду ртуті; позитивним полюсом — стальна пластина з сумішшю оксиду нікелю з графітним порошком. Пластина й рідина вміщуються в нікельований залізний ящик з одним невеликим отвором, закритим пробкою.

Реакції при розряджанні й заряджанні в залізо-нікельовому акумуляторі не цілком з'ясовані. ЕРС лужного акумулятора — близько 1,3 вольт.

95. Ємність акумулятора. Ємністю акумулятора називається повна кількість електрики, яку може дати акумулятор при розрядженні. Ємність виражається в ампер-годинах; ампер-година дорівнює 3600 кулонам. Акумулятор ємністю, наприклад, в 20 ампер-годин може дати всього 72000 кулонів. Використати таку кількість можна різними способами: або пропускаячи по колу протягом 20 годин струм в 1 ампер, або за 10 годин при величині струму в 2 ампера, або спершу протягом 4 годин — струм в 0,5 ампера, потім протягом 16 годин — струм в  $\frac{3}{4}$  ампера і, нарешті, протягом 6 годин — струм в 1 ампер і т. д.

Свинцеві акумулятори влаштовуються ємністю від 5 до 1000 ампер-годин; на кожний кілограм ваги його припадає від 3,5 до 6 ампер-годин.

96. Коефіцієнт корисної дії акумулятора. Якщо акумулятор заряджався протягом  $t$  години струмом в  $I$  амперів при напрузі на його пластинах в  $U$  вольтів, то енергія, затрачена на заряджання його,  $W = IUt$  ват - годин.

Якщо при розряджанні акумулятор давав протягом  $t_1$  години струм  $I_1$  амперів при напрузі на пластинах в  $U_1$  вольтів, то енергія розряджання  $W_1 = I_1 U_1 t_1$  ват - годин. Коефіцієнт корисної дії акумулятора дорівнює:

$$\eta = \frac{W_1}{W} = \frac{I_1 U_1 t_1}{IUt}$$

В сучасних акумуляторах цей коефіцієнт доходить до 75 — 85%.

97. Застосування акумулятора. 1. Акумулятори дають можливість зберігати електричну енергію в різних кількостях, переносити її в перше-ліпше місце і використати її в перший-ліпший час. Батареї акумуляторів є добрі джерела постійного струму для лабораторій.

2. Іноді на електричних станціях батареї акумуляторів викається паралельно динамомашині (рис. 124). При невеликій витраті в колі енергії, одержуваної від динамомашини, можна спробикувати надмір  $\Pi$  на заряджання акумуляторів (замкнути  $K_2$ ,  $K_3$  і  $K_1$  на  $b$ ); при великій витраті енергії акумуляторів складається з енергією динамо для живлення кола.

Прилучаючи  $K_1$  до  $a$ , можна живити зовнішнє коло тільки від динамо; прилучивши  $K_1$  до  $b$ , можна тільки заряджати батарею; розімкнувши  $K_1$  і  $K_3$  і замкнувши  $K_2$ , можна живити сітку тільки від акумуляторів.

3. Акумулятори застосовуються для освітлення автомобілів, автобусів, вагонів.

4. Батареї акумуляторів живлять мотори для пересування невеликих екіпажів, наприклад платформ для підвозу вантажів до вагонів на великих станціях. Зокрема акумулятори дають струм для живлення моторів у підводних човнах при русі під водою.

5. Нарешті, акумулятори мають застосування в радіоустановках для лампових приймачів.

#### Вправа 14.

1. Ємність акумулятора 20 ампер - годин. Скільки в ньому кулонів електрики? Який струм він може дати протягом 10 діб, працюючи до 12 годин на добу?

Відп. 0,17А.

2. Заряджання акумулятора струмом в 5 амперів при напрузі на його пластинах в середньому в 2,15 вольтів тривало 10 год. 10 хв. При розряджанні акумулятор давав струм в 6 амперів при напрузі в 2 вольтів протягом 7 год. 25 хв. Знайти коефіцієнт корисної дії акумулятора.

Відп. 0,81.

3. ЕРС елемента Вольта дорівнює 1 вольту; ЕРС поляризації в ньому дорівнює 0,5 вольтів. Яка буде потужність струму у зовнішньому колі з опором в 9 омів, якщо внутрішній опір елемента дорівнює 1 омів?

Відп. 0,0225 вт.

4. Батарея акумуляторів заряджалась протягом 15 год. струмом в 10 амперів при напрузі на затискачах батареї в 20 вольтів. Розрядний струм в 5 амперів, при напрузі в 18 вольтів, тривав 12 години. Знайти коефіцієнт корисної дії батареї акумуляторів.

Відп. 0,36.

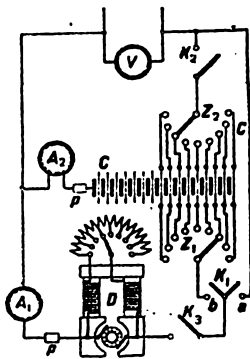


Рис. 124. Схема прилучення до динамо батареї акумуляторів.

5. ЕРС акумулятора 2 вольти; внутрішній опір 0,01 ома, гранична величина розрядного струму 20 амперів. У скільки разів величина струму при короткому замиканні ( $r_e = 0$ ) перевищуватиме граничну? *Відп.* 10.

6. Напруга в сітці повинна дорівнювати 110 вольтам; при заряджанні найменша напруга акумулятора 1,8 вольт; середня — 2,2 вольт; найбільша при заряджанні 2,75 вольт. Скільки акумуляторів треба ввімкнути в батарею, щоб вона підтримувала напругу кола при найменшій і нормальній напрузі кожного? Яка повинна бути напруга динамо, що заряджає цю батарею? *Відп.* 61; 50; 168.

7. Яку кількість свинцевих акумуляторів (розраховуючи по найменшій напрузі при розряджанні) і якої ємності треба придбати для живлення вартового освітлення протягом 4 нічних годин в кількості 100 штук 25-ватних лампочок, що горять під напругою 100 вольтів? Віддалі від станції до місця споживання 91,5 м; площа перерізу проводу 16 мм<sup>2</sup>. *Відп.* 58 ак.

8. Акумулятор на 20 ампер-годин служить для роззарядження двох ламп „мікро“ радіоприймача. На скільки годин вистачить заряду акумулятора, якщо через кожну лампу проходить струм величиною в 0,05 ампера? (Лампи сполучені паралельно.)

9. Автомобільна акумуляторна батарея складена послідовно з трьох акумуляторів по 2 вольти і з внутрішнім опором 0,1 ома кожний. Опір зовнішнього кола 11,7 ома. Знайти величину струму і спад напруги на кінцях кожного акумулятора. *Відп.* 0,05 вольт.

10. Батарея в 116 вольтів з внутрішнім опором в 0,3 ома заряджає акумуляторну батарею із зворотною ЕРС поляризації в 100 вольтів і повним опором в 0,2 ома. Проводи, що сполучають між собою позитивні полюси обох батарей, мають опір в 0,5 ома; проводи, що сполучають негативні полюси, — опір в 1 ом. Зарядження триває 10 годин.

Знайти: 1) величину заряджаючого струму; 2) повне число кулонів, що протікають по колу; 3) напругу в проводі, що сполучає позитивні полюси; 4) напругу в проводах, що сполучають негативні полюси; 5) спад потенціала на внутрішньому опорі заряджаючої батареї; 6) спад потенціала на внутрішньому опорі акумуляторної батареї; 7) електричну енергію, розпвану зарядною батареєю; 8) енергію, що йде на зарядження акумуляторної батареї (при ЕРС = 100 вольтам); 9) енергію, затрачену на нагрівання опорів в обох батареях і в сполучних проводах; 10) показ вольтметра на полюсах заряджаючої батареї при замкненому колі; 11) показ вольтметра на полюсах акумуляторної батареї при замкненому колі; 12) потужність заряджаючої батареї; 13) вартість зарядки

при ціні 20  $\frac{\text{коп.}}{\text{квт} \cdot \text{год.}}$ .

*Відп.* 1) 8 амперів; 3) 4 вольти; 8) 28 800 000 дж.; 11) 101,6 вольт; 13) 1 крб. 86 коп.

98. Технічне застосування електролізу. Прикладна електрохімія поділяється на дві основні частини: гальванотехніку і електрометалургію.

Гальванотехніка охоплює випадки електролітичного осадження металів безпосередньо на готові промислові вироби або на певним способом підготовлені форми цих виробів.

Електрометалургія полягає в добуванні через електроліз чистих металів.

Гальванотехніка оперує з водними розчинами металічних сполук. Залежно від того, для якої потреби осаджується метал і якої товщини осаджуваний шар, гальванотехніка поділяється на три види: гальваностегію, гальванопластику і гальванотипію.

Гальваностегія полягає в покритті металічного предмета тонким (від кількох мікронів) шаром іншого металу для

того, щоб запобігти псуванню першого металу або надати виробові більшої міцності і краси.

Гальванопластика має завдання одержувати товсті осади (від десятих частин до кількох міліметрів), відділювані від оригіналів і вживанні як самостійні предмети.

Гальванотипія має за мету здобувати масивні обolonки з предметів мистецтва й техніки (воскові статуї, мережива, тканини) або з природних предметів (листя, квіти, плоди, комахи).

В усіх випадках гальванотехніки предмет, покриваний металом, що осаджується, уміщується в електролітичну ванну як катод. За анод править метал, який має бути осаджений на даному предметі. Електроліт складається з водного розчину

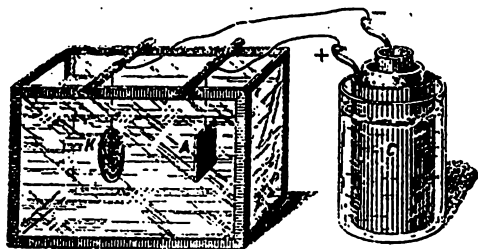


Рис. 125. Ванна для гальванопластики.

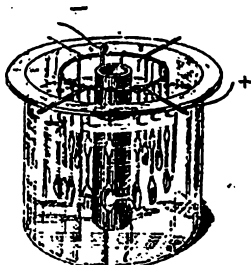


Рис. 126. Прилад для гальваностерії.

солі осаджуваного металу. Вибір солі даного металу, склад і концентрація розчину і величина струму, допущена для тієї чи іншої потреби, залежать від багатьох обставин і не можуть бути тут розглянуті, становлячи чисто технічне завдання.

Обмежимося тут рисунком гальванічної ванни (рис. 125), в якій провадиться осаджування металу, і рисунком (рис. 126), який показує спосіб підвищення металічних предметів для гальваностерії на катоді (наприклад для нікелювання).

Відмітимо окремі випадки гальванотехніки.

Матриці для грамофонних пластинок виготовляються гальванопластично з основної наспіваної пластинки.

Звук записується на восковій пластинці. З записаної воскової пластинки електролітичним способом здобувають металічний рельєфний відбиток. Вдавлюючи металічний відбиток у пластичну масу (різного складу в різних заводів), можна виготовити велику кількість пластинок, цілком схожих з оригіналом.

З друкарського набору, що складається з м'якого металу, робляться гальванопластичні знімки з міцнішого металу, або сам набір покривається гальваностегічно тонким шаром більш витривалого металу, і таким чином кількість відбитків збільшується у багато разів, наприклад, мідне кліше допускає до 40000 відбитків, а мідне гальванохромоване — до 150000.

Гальванопластику винайшов російський учений Якобі.

99. Електрометалургія. Електролізом користуються для здобування багатьох чистих металів. Вкажемо тут, як цим способом добувають мідь і алюміній. Для здобування міді електролітичним способом найчастіше користуються досить поширеною в природі мідною рудою — мідним колчеданом. Оброблена певним способом руда іде на електролітичний завод, де з такої обробленої руди одержують найчистішу рафіновану мідь. Виготов-

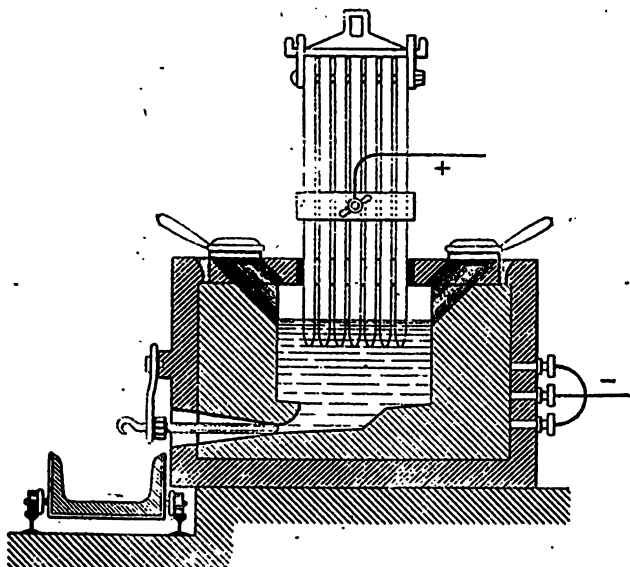


Рис. 127. Здобування алюмінію електролізом.

лення такої міді зводиться ось до чого: у великих електролітичних ваннах анодом служить зазначена вище оброблена руда, катодом служить тонкий лист чистої міді. Струм встановлюється такої величини, щоб переносилася з анода на катод сама тільки мідь<sup>1</sup>. На тонкий мідний лист катода наростає мідь, на ньому таким чином утворюються масивні пластини міді, які час від часу знімаються і замінюються знову тонкими листами міді.

Для здобування алюмінію піддають електролізу не розчини солей цього металу, а розтоплені оксиди його. Для цього користуються великими вугільними тяглями (рис. 127).

У тиглі всипають глинозему ( $Al_2O_3$ ), одержаного шляхом

<sup>1</sup> Порядок виділення металів з електроліту залежить від напруги на ванні; мідь виділяється при йменшій напрузі, ніж більшість металів.

перзробки руд, що містять алюміній (боксити). Сам тигель при цьому служить катодом. Анодом служать вугільні стрижки, встановлені в тигель. Спочатку вугільні стрижки опускають до сполучення з тиглем і пропускають сильний струм. Піднявши стрижки, дістаємо вольтову дугу, яка розтоплює глинозем. Після цього струм проходить через рідину, де і відбувається електроліз. Чистий алюміній скупчується на дні тигля, як на катоді, в розтопленому вигляді. Час від часу його випускають з нижнього отвору тигля. Metали: натрій, калій, магній та інші добуваються таким же способом.

Алюмінієві заводи, як такі, що споживають велику кількість електроенергії, будуються переважно коло великих гідроелектростанцій. Так, в 1932 р. пущено Дніпропетровський алюмінієвий завод.

**100. Електропровідність газу.** Газу й пара в звичайних умовах є поганими провідниками електрики. Цим пояснюється можливість електростатичних дослідів, при яких заряд, наданий ізольованому провідникові, може довгий час залишатися на провіднику. Спостережувані під час цих дослідів поступові втрати зарядів відбуваються здебільшого в наслідок недостатньої ізоляції підставок або підвісок.

Кулон ще наприкінці XVIII століття під час своїх досліджень над взаємодією наелектризованих тіл знайшов, що наелектризований ізольований провідник втрачає свій заряд не тільки через підставку, а й прямо в навколишнє повітря. Цим спостереженням був установлений факт електропровідності повітря в звичайних умовах.

Тепер відомо багато способів підвищувати електропровідність повітря. Найпростіший з них — внесення в повітря чи взагалі в газ полум'я. Якщо до зарядженого тіла, наприклад до електроскопа, піднести полум'я сірника або пальника, то заряд швидко зникає, і листочки електроскопа опадають.

Виникнення електропровідності газів у цьому випадку пояснюється розщепленням в полум'ї молекул газу на дві частини: електрон і позитивний іон. *Поділ молекул газів на електрон і позитивно заряджений іон називається іонізацією газу.*

Так само діють і інші явища, вкладувані в дальших частинах книги: удар електронів і іонів (§ 102); катодне проміння (§ 106); анодне проміння (§ 107); ультрафіолетове проміння (§ 208); рентгенове проміння (§ 219); промені радіоактивних речовин (§ 226). Всі перелічені тіла або явища, що спричиняють іонізацію, називаються іонізаторами.

Іонізація газу і іонізація рідин розрізняються між собою.

Електролітична дисоціація рідини полягає в розпаді молекули на дві групи атомів, що несуть на собі рівні і протилежні знаком заряди.

При іонізації газу від молекули завжди відокремлюються електрони, і залишається іон у вигляді зарядженої частини молекули.

Але електрони і газові іони здебільшого прилучаються до однієї або кількох нейтральних молекул, і, отже, виникають і в газі звичайні іони, легкі або важкі, залежно від числа прилучених нейтральних молекул. Ці рухомі газові іони приходять у рух в електричному полі і створюють електричний струм в газах.

Позитивно заряджений провідник притягує до себе негативні іони, створені якимнебудь іонізатором, і відштовхує від себе позитивні іони. Негативні іонія, що притяглися до позитивно зарядженого провідника, віддають недостаючі цьому тілу електрони, зменшують його позитивний заряд і нейтралізуються самі. Те саме буває і з негативно зарядженим провідником. Процес іонізації газу завжди супроводиться протилежним йому процесом відновлення нейтральних молекул з різноорієнтованих заряджених іонів, в наслідок їх взаємного притягання. Відновлення молекул з іонів називається молізацією газу, або рекомбінацією іонів.

При всякій іонізації настає рухом (динамічна) рівновага, при якій за кожну одиницю часу стільки ж відновлюється молекул, скільки розпадається на іони (порівняти з динамічною рівновагою, що настає при насичуванні простору паром). Якщо припинити дію іонізатора, то молізація почне переважати над іонізацією, і електропровідність газу зменшується. *Провідність газу — явище тимчасове*<sup>1</sup>. Цим іонізація газу відрізняється від іонізації розчинів. В розчині кількість дисоційованих молекул залишається незмінною.

**101. Залежність між величиною струму в газі і різницею потенціалів.** Як відомо, в металічних провідниках існує електронна провідність, тобто струм складається з рухомих електронів; електроліти мають іонну провідність, тобто в них електричний струм утворюється іонами, що рухаються у двох протилежних напрямках.

Як для провідників першого роду, так і для провідників другого роду величина струму в провіднику і різниця потенціалів на його кінцях (або напруга на провіднику) зв'язані між собою законом Ома.

Чи підлягає струм у газах тому ж закону?

Дослідження в газі робиться в іонізаційній камері. Ця камера (рис. 128) являє собою металічний ящик *A*, всередині якого знаходиться ізольований плоский конденсатор *C*. Одна пластинка його відведена в землю, друга — сполучається з одним полюсом батареї *B*, другий полюс якої відведено в землю.

Змінюючи число елементів у батареї, можна пластини конденсатора, сполучені з полюсом батареї, надавати різні потенціали *U*.

<sup>1</sup> Електропровідність повітря і при відсутності полум'я, яка спостерігалася Кулоном, пояснюється тим, що постійно діє якийнебудь з інших, перелічених вище, іонізаторів.

При відсутності іонізатора чутливий гальванометр, ввімкнений у коло, не покаже ніякого струму в колі.

Наблизимо тепер до віконця в іонізаційній камері якийнебудь іонізатор, наприклад рентгенову трубку.

Припустимо спершу, що обидві пластини конденсатора сполучені з землею. Тоді і при наявності іонізатора струму між пластинами і далі по колу не буде. Якщо поля немає, іони будуть у безладному русі.

Дамо тепер одній пластині малий позитивний потенціал. Напруженість утвореного поля рухатиме іони у певному напрямі: позитивні іони рухатимуться у напрямі напруженості поля від

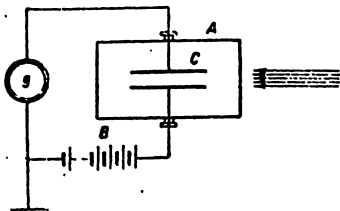


Рис. 126. Іонізаційна камера.

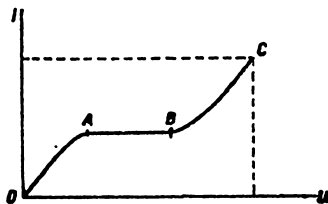


Рис. 128а. Графік залежності величини струму в газі від напруги.

позитивно зарядженої пластини до пластини з нульовим потенціалом, негативні іони — у протилежному напрямі. Виникає струм, величина якого вимірюється гальванометром.

Будемо поступово збільшувати потенціал пластини; величина струму поступово збільшується.

З вимірювань величини струму і прикладуваної до пластин напруги встановлено, що при малих напругах величина струму прямо пропорційна різниці потенціалів, або напрузі. Отже, *при малих напругах струм у газі підлягає закону Ом*. В цьому випадку з усього числа іонів, утворених іонізатором, більша частина молізується, і тільки частина, що лишається, досягає пластин, становлячи електричний струм.

В міру збільшення різниці потенціалів зростаюча напруженість поля збільшує швидкості іонів. Від цього зменшується число рекомбінацій і збільшується число іонів, що досягають пластин, тобто збільшується величина струму.

Якщо скласти графік залежності величини струму і напруги, відкладаючи на осі абсцис у вигляді відрізків значення напруги, і на осі ординат — значення відповідних величин струму, то ця частина явища виразиться частиною графіка *ОА*, близької до прямої, яка проходить через початок координат (рис. 128а).

При дальшому зростанні різниці потенціалів, прикладених до пластин, виникає така напруженість поля, при якій швидкості іонів зростають настільки, що рекомбінацій іонів не відбуватиметься<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Якщо вона і відбуватиметься, то практично її можна до уваги не брати.



У такому разі всі іони, утворювані за одиницю часу іонізатором, виносяться полем; величина струму досягає найбільшої можливої для даного іонізатора величини. Дальше збільшення різниці потенціалів уже не може збільшити величину струму, бо немає резервних іонів, які можна було б додатково пустити в хід. З цього моменту величина струму перестає залежати від напруги.

Струм, величина якого не залежить від різниці потенціалів, називається струмом насичення.

До струму насичення уже не можна застосувати закон Ома. На графіку ця частина явища зображається прямою АВ, паралельною осі абсцис.

При дальшому збільшенні різниці потенціалів величина струму починає зростати дуже швидко. Таке непропорціонально велике зростання величини струму, порівняно з зростанням напруги указує на те, що появилися іони ще від якоїсь іншої причини, крім тих, які утворені даним іонізатором. Цією новою причиною є іонізація поштовхом або ударом.

Ця остання стадія явища представлена на графіку частиною ВС.

**102. Іонізація ударом.** У міру зростання напруженості поля швидкості газових іонів зростають. Разом з швидкістю зростає і кінетична енергія іонів. При деякій різниці потенціалів, яка перевищує величину, що відповідає струмові насичення, кінетична енергія деяких дуже швидких іонів стає достатньою, щоб при зіткненні з нейтральною молекулою розщепити її на іони (електрон і позитивно заряджений іон).

При дальшому зростанні різниці потенціалів росте і число іонів, кінетична енергія яких достатня для розщеплення зустрічних молекул. Тоді один іон може створити при своєму русі багато іонів: після першого зіткнення іона з молекулою буде три іона; ці іони в свою чергу, під дією сил електричного поля набувають великих швидкостей і при зіткненні з нейтральними молекулами розщеплюють їх і т. д. Число іонів росте, як росте снігова грудка при паданні з гори; тому це швидке наростання числа рухомих іонів називається іонною лавиною.

Отже, одним із способів іонізації є іонізація ударом, при якій кінетична енергія рухомих іонів досягає значення, достатнього для розщеплення при ударі нейтральних зустрічних молекул на іони.

Зрозуміло, що величина струму у випадку, коли починається іонізація ударом, зростає значно швидше, ніж зростання напруги.

*Отже, сильне електричне поле в просторі між електродами само може створити умову, необхідну для проходження електричного струму через газ; для цього досить, щоб у цьому просторі був хоч один іон.*

**103. Розряд у газі при атмосферному тиску.** Через те що в повітрі завжди є невелика кількість іонів і через те що сильне електричне поле само виконує дальшу іонізацію ударом,

то при значній різниці потенціалів між електродами може відбуватися розряд і без стороннього іонізатора.

Розряди при атмосферному тиску відомі трьох різних видів.

*I. Тихий розряд.* а) При досяганні певної різниці потенціалів починається не світлий (темний) розряд. Він не супроводиться світловими явищами і може бути відзначений електрометром після спаду потенціала провідника. Такий розряд при даній різниці потенціалів найлегше починається між вістрям і площиною.

б) Китчастий розряд. Умови його виникнення: підвищення різниці потенціалів між електродами, збільшення величини струму між ними, невеликі розміри електродів, значна віддаль між ними.

Вид китчастого розряду: у анода світна фіолетова китичка, у катода — світна зірочка. Китчастий розряд складається з маленьких іскор, що швидко гаснуть в міру віддалення від провідника.

Таке ж сяяння буває на кінцях щогол, у верховіттях дерев і на інших вістрях тоді, коли напруга атмосферної електрики досягає величезних розмірів; це сяяння має назву „вогнів Ельма“.

Величина струму при такому тихому розряді вимірюється десятитисячними частинами ампера.

Якщо на одному з електродів є вістря, розряд починається при менших потенціалах, ніж тоді, коли електроди не мають вістер; при цьому для того випадку, коли вістря має негативний заряд, розрядна напруга менша, ніж для випадку позитивно зарядженого вістря. Якщо вістря заряджене негативно, то до нього направляються позитивні іони, які, крім іонізації газу по дорозі до вістря, вибивають ще електрони з самого негативно зарядженого вістря. Це останнє явище не має місця, якщо вістря заряджене позитивно; тому у цьому випадку кількість іонів газу, які беруть участь в електричному струмі, при тій же нарузі менше, ніж у випадку негативно заряду на вістрі.

в) Коронний розряд. На проводах високої напруги, по яких передається енергія від електростанцій, особливо у випадку наявності на них нерівностей, гострих країв та ін., в темноті спостерігається свічення. Це свічення покриває провід світним чохлом, що дістав назву корони. У випадку корони відбувається розряд між проводами. Однак наявність другого провода не обов'язкова; його може замінити земля, тобто розряд може відбуватися між проводом і землею. Корона є джерелом втрат у лініях передачі високої напруги.

*II. Розряд у вигляді вольтової дуги.* Якщо віддаль електродів зменшується і самі електроди починають нагріватися, то між ними починається розряд у формі вольтової дуги, що складається не тільки з розжарених газів, а й з розжареної пари тих металів, з яких зроблені електроди. Присутність пари можна узнати по лініях у спектрі дуги. Утворення і застосування вольтової дуги розглянуто у § 64.

*III. Іскровий розряд.* Коли напруга між якиминибудь точками достатня для іонізації поштовхом, але немає безперервного

припливу електрики, необхідної для підтримання постійного струму, то виникає короткочасний розряд, що виявляється у вигляді іскри. Іскровий розряд, наприклад, відбувається між кінцями вторинної обмотки в індукційній котушці, між обкладками конденсаторів, сполучуваними розрядником, між двома різнойменно зарядженими хмарами або між хмарою і землею. Іскровий розряд атмосферної електрики називається блискавкою.

Для всякого газу є певна різниця потенціалів, нижче якої через нього не може проскочити електрична іскра, який би не був тонкий шар газу між електродами. Такими граничними значеннями для різниці потенціалів є: для повітря 341 вольт; для кисню—455 вольтів; для водню—278 вольтів; для вуглекислоти—419 вольтів.

Довжина іскри може правити за наближену міру різниці потенціалів між електродами.

Якщо електроди взято у формі дисків, тоді

Довжина іскри в см	0,02	0,043	0,091	0,215	0,286	0,323
Різниця потенціалів у вольтах . .	1000	2000	4000	8000	10 000	11 000

**104. Блискавка.** Блискавка є найграндіозніша форма іскрового розряду в нижньому шарі атмосфери, яка вирівнює потенціали між хмарою і землею або між хмарами.

Лінійна, або іскова, блискавка виникає, коли напруженість поля атмосферної електрики досягає 30 000  $\frac{\text{вольт}}{\text{см}}$ . Товщина каналу блискавки 40—50 см; канал майже завжди розгалужується. Довжина блискавки досягає до 10 км. Величина струму доходить в середньому до 20 000 амперів. При тривалості блискавки в 0,001—0,002 сек. в ній проходить не більше 100 кулонів електрики.

**105. Розряд у розріджених газах.** Іони можуть доставити необхідну для руйнування молекул кінетичну енергію не тільки від збільшення напруги, а й при незмінній напрузі від збільшення вільного шляху пробігу від зіткнення до зіткнення з молекулою; на довгому шляху більш тривале діяння сили може надати більшу швидкість, так що набутої в кінці шляху енергії буде досить для розщеплення молекули при меншій порівняно напрузі. Збільшення шляху пробігу газових іонів може бути досягнуто розрідженням газу в скляній трубці. Щоб спостерігати розряд у розріджених газах, електроди впаюються в трубку, звідки викачується повітря, і сполучаються з джерелом напруги (з провідниками електрофорної машини або з кінцями вторинної обмотки котушки Румкорфа, § 134).

В міру викачування газу з трубки при одній і тій же віддалі електродів електричний розряд міняє свій вигляд.

Початкове сяєння змінюється тонким іскровим джгутиком і при тиску, що дорівнює 0,01 атмосферного тиску, переходить

в широкий світлий стовп з різним свіченням коло анода й катода (рис. 129, *a*). При дальшому розрідженні повітря анодне сяяння стає рожевуватим, катодне—голубуватим (рис. 129, *b*). Далі сяяння розпадається на шари (рис. 129, *c*, *d*). При ударі об молекули швидкість іона зменшується, і попередня величина швидкості знову досягається тільки після нового пробігу, тому іонізація від зіткнення виходить тільки в деяких місцях трубки. Свічення виникає в тих частинах трубки, де відбувається іонізація ударом; звідси походить шаруватість свічення. При мільйонній

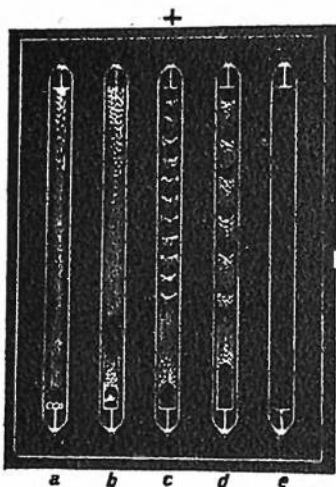


Рис. 129. Різні види сяяння в міру розрідження газу.

частині атмосферного тиску сяяння зникає зовсім, а починає світитися скло проти катода (рис. 129, *e*).

**106. Катодне проміння.** Якщо в трубці з розрідженням до мільйонної частини атмосфери, так званій кружковій<sup>1</sup> трубці, зробити якийнебудь фігурний анод,

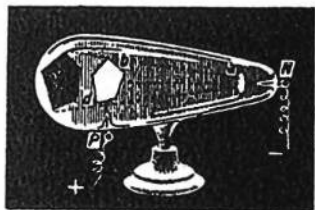


Рис. 130. Прямолинійне поширення катодних променів.

(рис. 130), то скло проти катода світиться не все, а на ньому по'являється темна частина (тінь) такої ж форми. Якщо піднести до трубки магніт, то тінь сходить з свого місця. Зміщення тіні указує на те, що в трубці існує струм, тобто відбувається рух електрики. Підносячи різні полюси магніта і спостерігаючи зміщення, можна за правилом лівої руки визначити напрям струму. Спроба показує, що в кружковій трубці рухається негативна електрика від катода (рис. 131, *a*). До того ж висновку приводить і зміщення тіні під впливом позитивно або негативно заряджених пластинок: перша притягує до себе цей потік, друга відштовхує його (рис. 131, *b*).

В 1895 р. Перрен спрямував потік катодних частинок, що виходять з катода, всередину циліндра (рис. 132), вміщеного

<sup>1</sup> За ім'ям англійського ученого Крукса, що займався дослідженнями розряду в розріджених газах у 1880 р.

всередині трубки, і через дрітину, впаяну в трубку, сполученого з електроскопом. Електроскоп показав негативний заряд.

Всі ці досліди привели до висновку: у кружковій трубці від катода несеться потік електронів. Цей потік електронів дістав назву катодного проміння.

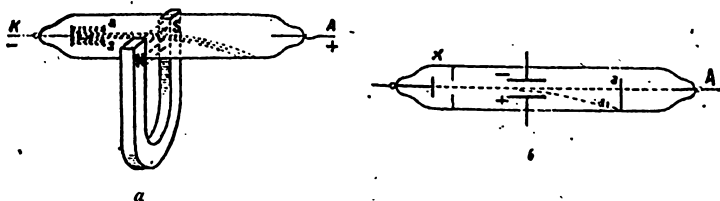


Рис. 131. *a* — відхилення катодних променів в магнітному полі; *b* — відхилення катодних променів в електричному полі.

Уявлення про швидкість руху катодних частинок і про величину їх маси й заряду можна скласти, спостерігаючи величину зміщення тіні від катодних променів в магнітному і електричному полях і вимірюючи напругу, під якою відбувається розряд.

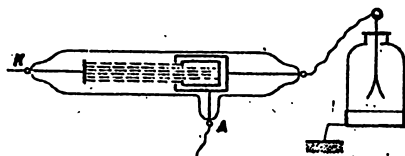


Рис. 132. Схема установки Перрса для виявлення негативних частинок, з яких складається катодне проміння.

Властивості катодного проміння:

1. Відхиляється від початкового напрямку під впливом магнітного поля.
2. Відхиляється від початкового напрямку під впливом електричного поля.
3. Затримується різними тілами (спроба з зіркою).
4. Поширюється прямолінійно (геометрична форма тіні).
5. Направлене перпендикулярно до поверхні катода незалежно від положення анода (рис. 133): свічення трубки завжди на стороні, протилежній катоду.

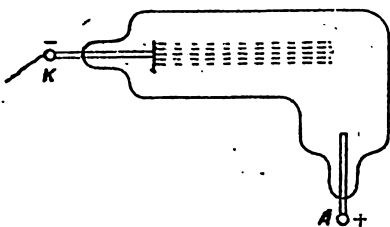


Рис. 133. Напрямок катодного проміння перпендикулярний до поверхні катода незалежно від положення анода.

6. Збирається в центрі вгнутого катода, що має сферичну форму, а це підтверджує прямолінійність його поширення.

7. Нагріває і може довести до розжарення або навіть до топлення кусочок платини, вміщеної в фокусі вгнутого катода.

8. Спричиняє свічення, і при тому різними кольорами, крім скла, також карбонатних, сульфатних, сульфідних солей кальція та інших металів, вміщених на його шляху<sup>1</sup>.

9. Катодне проміння, що падає на крила легкого коліщатка, приводить його в рух, протилежний рухові електронів. Останні три спроби указують на те, що рухомі електрони мають *кінетичну* енергію, яка перетворюється то в енергію свічення, то в теплову.

10. Обчислення показують, що *маси електрона* приблизно в 1840 раз менша маси найлегшого атома, а саме, атома водню.

11. *Швидкість електронів* залежно від прикладеної напруги різна, досягаючи іноді однієї третини швидкості світла (§ 156).

12. Величина *заряду частинки*, що рухається від катода, дорівнює  $16 \cdot 10^{-20}$  кудонів, що й дало підставу вважати катодне проміння за потік електронів.

13. Катодне проміння іонізує газ.

Свічення розріджених газів при проходженні через них електронів відбувається в природі у вигляді величного явища полярних сяйв. Полярне сяйво спричиняється рухом електронів через розріджені газы атмосфери на висоті близько 400—500 км. Річна кількість полярних сяйв має такий же хід, як і кількість сонячних плям, тому можна думати, що електрони, які спричиняють полярне сяйво, мають сонячне походження.

107. **Анодне проміння.** Якщо вмістити катод всередині трубки і зробити в ньому отвори (рис. 134), то в просторі за катодом (по другий бік анода) також можна виявити свічення скла. Спробою з тінню можна виявити, що тінь віддаляється від позитивно наелектризованої пластинки і притягується до наелектризованої негативно.

Магнітне поле спричиняє відхилення тіні в бік, протилежно відхиленню катодного проміння. Ці спроби приводять до висновку, що в *кружковій трубці в закатодному просторі несеться потік частинок, заряджених позитивно*. Потік позитивно заряджених частинок у кружковій трубці рухається так, ніби він виходив від анода; він називається анодним промінням.

Анодне проміння: 1) відхиляється в магнітному полі; 2) відхиляється в електричному полі (багато слабше, ніж катодне проміння); 3) спричиняє свічення солей; 4) сильно вбирається газами та іншими тілами; 5) іонізує газы; 6) рухається з швидкістю до  $10^7$  см/сек; 7) складається з іонів того газу, який міститься в трубці (і з невеликої кількості частинок електродів).

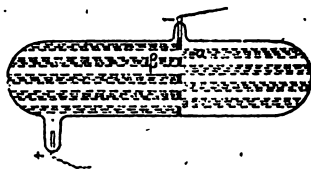


Рис. 134. Анодне проміння.

<sup>1</sup> Таке свічення без підвищення температури називається люмінесценцією.

108. Термоселектронний струм. Потік електронів у трубці, звідки викачано повітря, можна дістати і без значної електричної напруги, як це буває в кружковій трубці.

Треба згадати, що в металах є вільні електрони (§ 8). Вільні електрони в металах перебувають в постійному русі, але рухи ці хаотичні. Швидкості руху вільних електронів, так само, як і самих молекул тіла, збільшуються з підвищенням температури. При температурі розжарення деякі з електронів, швидкості яких зросли до значної величини, можуть вилітати за межі тіла. Електрони, які вилітають з розжареного провідника, дістали назву термоселектронів.

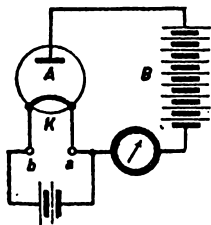


Рис. 135. Схема електронної лампи.

Якщо ввімкнути пустотну<sup>1</sup> трубку в коло батареї В (рис. 135) з невеликою ЕРС, то, поки катод лишається холодним, в такому колі ніякого струму не буде, бо розріджені гази між катодом К і анодом А є непровідники.

Але в міру розжарення катода К струмом від додаткової невеликої батареї з нього починає вилітати дедалі сільніший потік електронів. Ці електрони, що виходять з катода, притягуюватимуться позитивно зарядженим анодом, і, отже, встановлюється постійний термоелектронний струм всередині трубки від катода до анода, що відповідає технічному напрямові струму від анода до катода. Пустотна трубка, в якій встановлюється струм при розжаренні катода, називається електронною (катодною) лампою.

Якщо сполучити електрод А лампи з негативним полюсом батареї В, а електрод К — з позитивним, то термоселектрони, викликані розжарюванням електродом К, уже не понесуться до електроду А, бо на ньому тепер знаходиться негативний заряд, який відштовхуватиме від себе електрони. В цьому випадку струму через лампу не буде.

Якщо ж сполучити електроди А і К з джерелом змінного струму, то через лампу проходитиме струм тільки тоді, коли А буде анодом і К — катодом. На цій властивості лампи засноване її застосування як випростувача змінного струму.

Інші важливі застосування електронна лампа має в радіотехніці, і тут її будова складніша (§ 141).

### ЗАПИТАННЯ.

1. Що називається електролітичною ванною? анодом? катодом?
2. Що називається електролітом? Які речовини є електролітами?
3. Як відбувається розчинення речовини при утворенні електроліту?

<sup>1</sup> Трубка з високим ступенем розрідження.

4. Що називається іоном? аніоном? катіоном?
5. У чому полягає процес проходження струму через електродити?
6. Що таке електроліз?
7. У чому полягають вторинні реакції при електролізі? Наведіть приклади їх.
8. Чи є дистильована вода провідником? Чи може бути електроліз дистильованої води?
9. В результаті чого можна мати електроліз води?
10. Що називається хімічним еквівалентом? валентністю? Як виражається хімічний еквівалент через атомну вагу і валентність?
11. Що таке грам-еквівалент речовини?
12. Що називається електрохімічним еквівалентом?
13. В чому полягають закони Фарадея для електролізу?
14. Написати формулу законів Фарадея для електролізу.
15. Яка кількість кулонів потрібна при електролізі грам-еквівалента речовини?
16. Скільки атомів у грам-еквіваленті речовини?
17. Що таке електрон? На яких явищах засновано поняття про нього?
18. Показати, на прикладах, скільки електронів несуть на собі різні йони.
19. В чому полягає поляризація елементів?
20. Що таке деполіризація? Пояснити її на елементі Данієля.
21. В чому полягає поляризація електродів?
22. Коли не буває поляризації електродів?
23. Що називається ЕРС поляризації?
24. Вище якого граничного значення має бути напруга на електродах, щоб відбувався електроліз?
25. Для якої потреби можна користуватися ЕРС поляризації?
26. Як називаються прилади, в яких використовуються ЕРС поляризації?
27. Як будуються, заряджаються і діють кислотні акумулятори?
28. Описати будову лужних акумуляторів.
29. В яких одиницях виражається ємність акумулятора?
30. Що називається ампер-годиною?
31. Як обчислюється коефіцієнт корисної дії акумулятора?
32. Що називається батареєю акумуляторів?
33. Що називається послідовним сполученням акумуляторів у батарею?
34. Чому дорівнює ЕРС і внутрішній опір батареї акумуляторів?
35. Як розрахувати величину струму в колі від батареї акумуляторів?
36. Яке застосування акумуляторів?
37. В чому полягає іонізація газів?
38. Які є способи іонізації газів?
39. Як відбувається проходження електрики через газ?
40. Що таке струм насичення в газі? Чим він зумовлюється?
41. Перелічити види розряду в газі і умови їх виникнення.
42. Як вид розряду в газі залежить від міри його розрядження?
43. Яке походження і властивості катодного проміння?
44. Указати походження і властивості анодного проміння.
45. Що таке термоелектронний струм? Що називається електронною лезіною? В чому полягають її властивості? Як випрошується струм?

## V. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ.

109. Умова виникнення і величина ЕРС індукції. Вще було з'ясовано, що електричний струм створює навколо себе магнітне поле. Природно поставити питання, чи не можна з допомогою магнітного поля збудити струм? Ця думка виникла у Фарадея, і відповідь на поставлене питання була дана ним у 1831 р.

Справді, виявилось, що в замкненому провіднику виникає електричний струм всякий раз, як провідник переміщається відповідно в магнітному полі.



Ці струми, збуджені в замкнутому провіднику при русі його в магнітному полі, називаються індукційними.

Напряга індукційного струму називається ЕРС індукції.

Збудження в провіднику ЕРС індукції називається електромагнітною індукцією.

Розглянемо, від яких умов залежить виникнення індукції і величина ЕРС індукції.

Як джерело магнітного поля візьмемо сильний підковоподібний магніт (рис. 136). Як прилад для виявлення струму візьмемо чутливий гальванометр. Спочатку спробою з відомим джерелом струму треба выяснити, якому напрямові струму в колі відповідає відхилення покажчика гальванометра в один бік і якому — в другий бік.

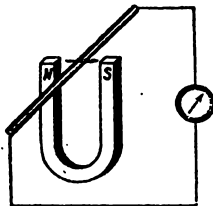


Рис. 136. Схема установки спроби для виявлення електромагнітної індукції.

1-а спроба. Поставимо магніт так, щоб його силові лінії пішли зліва направо. Виділивши прямолінійну ділянку кола і вмистивши її перпендикулярно до силових ліній магніта, опустимо її між вітками магніта, перерізаючи силові лінії під прямим кутом.

Гальванометр дє на короткий час відхилення, що триває тільки під час переміщення.

За напрямом відхилення можна визначити напрям індукційного струму.

Висновок: *ЕРС індукції виникає в провіднику при переміщенні його в магнітному полі.*

Лишаємо провідник без руху між вітками магніта; гальванометр не дає ніякого відхилення.

Висновок: *Поки відносне положення провідника і магнітного поля не міняється, індукції немає.*

2-а спроба. Висунемо тепер провідник з простору між полюсами магніта. Прилад покаже індукційний струм, що триває тільки під час руху провідника і має напрям, протилежний напрямові струму в попередній спробі.

3-я спроба. Перевернемо магніт так, щоб силові лінії йшли справа наліво. Повторимо опускання провода, дістаємо індукційний струм такого ж напрямку, як і в другій спробі, при висуванні провідника.

4-а спроба. Висуваючи тепер провід, дістаємо в провіднику струм такого ж напрямку, як і у першій спробі.

Висновок з перших чотирьох спроб: при перетині провідником силових ліній магнітного поля в провіднику індуктується ЕРС індукції, напрям якої залежить від напрямку магнітних силових ліній і від напрямку руху провідника.

5-а спроба. Чи залежить величина ЕРС індукції від кута, під яким напрям руху провідника перетинає силові лінії? Взнявши установку першої спроби, зробимо послідовно переміщення з однією і тією ж швидкістю уперек силових ліній, похило до них, уздовж їх (рис. 137). В першому випадку маємо найбільшу

величину ЕРС індукції, в останньому випадку індукції не спостерігається.

Теорія і спроба показують, що *ЕРС індукції прямо пропорційна синусу кута, утвореного напрямом переміщення провідника з напрямом магнітних силових ліній* (в першому випадку кут дорівнює  $90^\circ$ ,  $\sin 90^\circ = 1$ , в останньому кут  $0^\circ$  і  $\sin 0^\circ = 0$ ; в проміжних випадках:  $0 < \sin \alpha < 1$ ).

6-а спроба. Чи залежить ЕРС індукції від швидкості переміщення провідника?

Взявши установку першої спроби, опускають або підіймають один і той же провідник з різними швидкостями. Спроба показує, що більшим швидкостям відповідає більше відхилення показу прилада, отже більша ЕРС індукції.

Теорія і спроба встановлюють, що *ЕРС індукції прямо пропорційна відношій швидкості переміщення провідника щодо силових ліній*.

7-а спроба. Чи залежить ЕРС індукції від напруженості магнітного поля? Беремо два підковоподібних магніта різної сили. Їх різницю можна виявити з різного відхилення кожним з них магнітної стрілки на одній і тій же віддалі або з різних їх підіймальної сили. Перерізаючи одним і тим же провідником з однією і тією ж швидкістю в одному й тому ж напрямі силові лінії кожного магніта, можна виявити, що ЕРС індукції більша в тому випадку, коли магнітне поле сильніше.

Теорія і спроба встановлюють, що *ЕРС індукції прямо пропорційна напруженості магнітного поля  $H$* .

8-а спроба. Чи залежить ЕРС індукції від довжини тієї частини провідника, яка перетинає магнітні силові лінії?

Згинаємо рухомий провідник один раз так, щоб його прямокутній частині, яка перетинає магнітні лінії, дорівнювала всій ширині підковоподібного магніта, другий раз — половині цієї ширини. Роблячи в обох випадках цілком однакові рухи, побачимо, що в першому випадку ЕРС індукції в два рази більша, ніж у другому.

Теорія і спроба встановлюють, що *ЕРС індукції прямо пропорційна довжині  $l$  пересуваного в магнітному полі відрізка провідника*.

9-а спроба. Нарешті, якщо ми зігнемо дротину у вигляді спіралі прямокутного перерізу з різним числом витків і будемо робити однакові щоразу переміщення, то помітимо, що ЕРС зростає з збільшенням числа витків.

Це значить, що ЕРС індукції, збуджувані при русі в кожному витку, складаються послідовно.

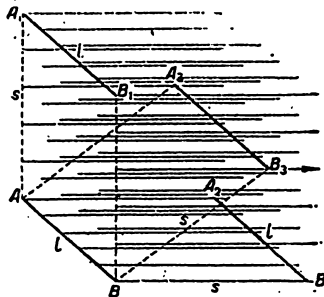


Рис. 137.

Об'єднуючи всі окремі висновки разом, дістанемо загальний висновок:

**ЕРС індукції, збуджувана при русі відрізка провідника в магнітному полі, прямо пропорціональна напруженості магнітного поля, довжині цього відрізка, швидкості його переміщення і синусу кута між напрямом переміщення і напрямом магнітних силових ліній.**

Наведене правило можна замінити іншим, що виражає залежність величини ЕРС індукції від числа перерізуваних за одиницю часу силових ліній магнітного поля.

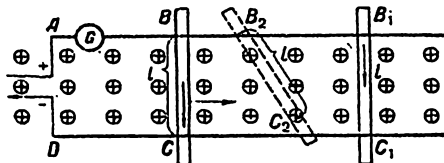


Рис. 137а.

Справді, уявимо собі електричне коло, одна дільниця якого рухатиметься в однорідному магнітному полі (рис. 137а). Ми вже знаємо, що при русі цієї дільниці кола з положення  $BC$  в положення  $B_1C_1$  в ній виникає ЕРС індукції, величина якої визначається наведеним вище правилом. В той же час з рисунка видно, що при своєму русі провідник перетинає силові лінії магнітного поля. Число перетятих ліній за певний відрізок часу, як легко зміркувати, залежить від швидкості руху провідника, напруженості поля (різний ступінь густоти силових ліній), від довжини відрізка провідника і кута, під яким відбувається переміщення.

Якби провідник рухався не в перпендикулярному до його довжини напрямі, а в похилому, наприклад, перейшов би в положення  $B_2C_2$ , то той же відрізок  $l$  у цьому випадку перетяв би менше число силових ліній.

Тому попередньому правилу можна надати іншого вигляду.

**ЕРС індукції прямо пропорціональна числу магнітних силових ліній, перетинаних провідником за 1 секунду.**

Нарешті, з цього ж рисунка видно, що при переміщенні провідника змінюється число силових ліній (силовий потік), які переходять через площу, обмежену контуром провідника.

Коли рухома частина провідника знаходилася в положенні  $BC$ , через площу, обмежену контуром  $ABCD$ , проходило число  $\Phi_1$  магнітних силових ліній, через площу ж, обмежену контуром  $AB_1C_1D$ , проходить інше число  $\Phi_2$  силових ліній.

Отже, за одиницю часу сталася зміна на  $\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t} = \frac{\Phi}{t}$  силових ліній. З рисунка знову ж таки видно, що це число буде тим більше, чим більша довжина провідника, напруженість поля, швидкість переміщення.

Тому можна дати ще таке формулювання для закону електромагнітної індукції:

**ЕРС індукції прямо пропорціональна швидкості зміни числа силових ліній, що проходять через площу, обмежену провідником.**

Це формулювання для закону електромагнітної індукції є найбільш загальним; справа в тому, що, як показують спроби, в провіднику появляється ЕРС індукції щоразу, коли змінюється число силових ліній, що проходять через площу, обмежену провідником, яка б не була причина, що викликає цю зміну.

Якщо, наприклад, створити всередині котушки поле з 100 000 силових ліній, то весь час виникнення цього поля в котушці діятиме ЕРС індукції, і ця ЕРС індукції буде різна залежно від того, чи буде це поле створене за 1 секунду чи за  $\frac{1}{2}$  секунди, чи за 0,1 секунди.

**110. Правило Флеммінга для напрямку індукційного струму.** Рисунок 138 показує взаємне розміщення трьох напрямів: напрямку силових ліній  $H$  магнітного поля, напрямку  $F$  руху провідника в магнітному полі і напрямку ЕРС індукції  $E$ , яка виникає під час руху провідника в магнітному полі.

Показані на рисунку напрямки в усіх чотирьох випадках установлені на підставі експериментів, описаних в § 109.

Для визначення напрямку ЕРС індукції  $i$ , отже, напрямку індукційного струму в провіднику за заданими двома іншими напрямками, Флеммінг дав практичне правило, так зване правило правої руки.

Правило Флеммінга полягає ось у чому: *треба розсунути під прямим кутом вказівний і великий пальці правої руки і середній палець поставити перпендикулярно до двох перших, потім направити вказівний палець у напрямку силових ліній, великий — в напрямку руху провідника; тоді середній палець покаже напрям ЕРС індукції.*

**111. Лабораторна робота 4.** Виведення законів індукції струмів.

Прилади: 1) сильний магніт підковоподібний (або прямий); 2) гальванометр; 3) котушка без осердя; 4) намотана на стрижень з м'якого заліза котушка, зовнішній діаметр якої менший діаметра отвору першої котушки; 5) 1 — 2 акумулятори; 6) ключ (рубильник); 7) проводи; 8) реостат.

**Завдання 1.** Спостерігайте індукцію струму магнітом.

Хід роботи. 1. Складіть коло з великої котушки, проводів і гальванометра.

2. Опустіть магніт  $N$ -полюсом усередину котушки і спостерігайте покази гальванометра.

3. Виймайте магніт з котушки і спостерігайте докази гальванометра.

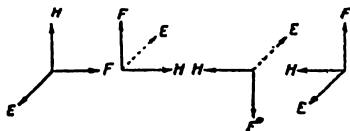


Рис. 138 Правило правої руки Флеммінга.

4. Переверніть магніт  $S$ -полюсом униз і повторіть спроби 2 — 3.

5. Зробіть схематичні рисунки попередніх установок, позначивши на них полюси магніта, напрям руху магніта і напрям індукційного струму. Порівняйте напрям індукційного струму і напрям амперового струму (§ 84) на навідному кінці магніта (при вирисовуванні витків котушки передні частини витків вирисовувати товстими лініями, задні — тонкими).

6. Чи індуктується струм при нерухомому магніті, хоч би магніт і знаходився всередині котушки?

7. Чи індуктується струм, якщо переміщати котушку з магнітом всередині її, не змінюючи їх відносного положення?

8. Чи індуктується струм, якщо магніт тримати нерухомо, а котушку надвати на той чи інший полюс або знімати з нього? Порівняйте напрям індукційного струму в цьому випадку з напрямом у спробах 2 — 4.

9. Який напрям індукційного струму при опусканні  $N$ -полюса магніта? Який полюс утворюється на тому кінці котушки, через який вводиться магніт? Яка взаємодія між опусканим полюсом магніта і виникаючим полюсом соленоїда?

10. Те саме при вийманні  $N$ -полюса?

11. Те саме при опусканні  $S$ -полюса?

12. Те саме при вийманні  $S$ -полюса?

13. Який загальний висновок щодо взаємодії між полюсами магніта, що переміщуються, і індукційним струмом у котушці?

14. Які рухи магніта і провідника спричиняють індукційний струм?

15. Повторіть одну із спроб 2, 3, 4, всуваючи і висуваючи магніт кілька разів з різними швидкостями.

Як впливає швидкість переміщення магніта на величину ЕРС індукції? Як впливає швидкість переміщення магніта на зміну числа силових ліній, що перетинаються контуром котушки? Який зв'язок між ЕРС і зміною числа силових ліній, що перетинаються контуром?

**Завдання 2.** Спостерігати індукцію струму струмом.

Хід роботи. 1. Складіть одне коло: акумулатори, рубильник, котушка з залізним стрижнем; друге коло: гальванометр і велика котушка.

2. Замкніть струм у першій котушці, вставляйте її в другу, спостерігайте в цей момент покази гальванометра і запам'ятайте напрям індукційного струму.

3. Виймайте котушку, спостерігайте покази гальванометра і запам'ятайте напрям індукційного струму.

4. Змініть напрям струму у першій котушці на протилежний і повторіть спостереження 2, 3.

5. Зробіть схематичні рисунки чотирьох попередніх установок і позначте на них напрями індукуючого струму в першій котушці і індукційного — в другій.

Як направлений індукційний струм порівняно з індукуючим

при зближенні котушок? як направлений — при віддалянні їх? Які будуть полюси на найближчих кінцях обох котушок при зближенні їх? які — при віддалянні? Яка взаємодія індукуючого і індукційного струмів при зближенні котушок? яка — при віддалянні?

6. Замкніть струм у внутрішній котушці і вставте її в зовнішню. Чи індуктуватиметься струм, в той час як одна котушка знаходиться в спокої всередині другої? Переміщайте обидві котушки, не змінюючи їх відносного положення. Чи індуктується струм?

7. Замкніть струм у внутрішній котушці, вставляйте її в зовнішню і виймайте її з різними швидкостями. Чи впливає швидкість відносного переміщення котушок на величину ЕРС індукції? Який цей вплив?

8. Не замикаючи струму в першій котушці, вставте внутрішню у зовнішню.

9. Замкніть струм у першій котушці в тому ж напрямі, як і в спробі 2. Який показ гальванометра?

10. Розімкніть струм у першій котушці. Який показ гальванометра?

11. Не виймаючи котушки, перемкніть струм у першій котушці, як у спробі 4, і замкніть струм. Який показ гальванометра?

12. Розімкніть струм. Який показ гальванометра?

13. Який напрям індукційного струму порівняно з індуктуючим при замиканні індукуючого (спроби 9, 11)? який — при розмиканні (спроби 10, 12)? Яким попереднім спробам відповідає напрям струму в спробах 9, 11? яким — у спробах 10, 12?

14. Ввімкніть у коло меншої котушки реостат, вставте її всередину другої; замкніть струм у першій котушці такого ж напрямку, як і в спробі 2, і швидким рухом рухомого контакту вимкніть частину опору, збільшивши, таким чином, величину індукуючого струму. Який показ гальванометра?

15. Таким же швидким пересуванням рухомого контакту збільшіть опір і, отже, зменшіть величину індукуючого струму. Який показ гальванометра?

16. Який напрям індукційного струму порівняно з індуктуючим при посиленні останнього? який — при ослабленні? В якій з попередніх спроб напрям індукційного струму був такий самий, який має індукційний струм при посиленні індукуючого? в якій — при ослабленні?

17. Перелічіть випадки, коли індукційний струм має напрям, однаковий з індуктуючим, і випадки, коли їх напрями протилежні.

18. Яка зміна числа силових ліній всередині індукуючого провідника відбувається в тих випадках, коли індуктується струм напрямом, протилежним індукуючому? однакового з індуктуючим? Який зв'язок можна встановити між напрямом індукційного струму і зміною числа силових ліній всередині контура провідника?

19. Яка взаємодія між індукційним і індуктуючим струмами в випадках замикання і посилення, розмикання і ослаблення?

20. За рахунок якої енергії виникає індукційний струм?

112. Правило Ленца для електромагнітної індукції. Поки є в провіднику індукційний струм, магнітне поле діє на нього з силою, напрям якої визначається правилом лівої руки Флеммінга.

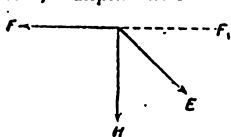


Рис. 139. Зв'язок правил Ленца і Флеммінга.

Застосувавши до індукційного струму правило лівої руки (рис. 139), побачимо, що дія поля на індукційний струм, що виникає, надає йому рух, протилежний тому рухові, завдяки якому індуктується струм. Отже, магнітне поле індукційного струму впливає гальмуюче на рух, який спричиняє індукцію. Щоб підтримувати рух, який спричиняє індукцію, треба затрачувати роботу на перемагання тієї затримної дії, яку чинить магнітне поле на провідник індукційним струмом. Ця робота більша, ніж та, яку треба було б затратити на переміщення того ж провідника на ту ж віддаль у відсутності магнітного поля. Надмір роботи, затрачуваної при переміщенні провідника в магнітному полі, порівняно з роботою у відсутності поля, і є джерелом тієї енергії, яка витрачається в індукційному струмі.

Ця залежність є одним із окремих проявів закону перетворення і зберігання енергії. Правило, з допомогою якого можна визначити напрям індукційного струму, дав ще в 1834 р. російський учений академік Ленц. Це правило, назване правилом Ленца, можна виразити так.

*При переміщенні магніта або провідника із струмом відносно другого замкненого провідника, в останньому індуктується струм такого напрямку, що цей струм своїм магнітним впливом перешкоджає тому рухові, яким він наводиться.*

В курсі IV класу і на лабораторній роботі ви узнали, що можна індуктувати струм і при відносному спокої магнітів і провідників. При нерухомому положенні обох котушок можна індуктувати струм в одній замкненій котушці, якщо замикати або посилювати струм, розмикати або послаблювати струм у другій, сусідній котушці.

Досліди показують, що при замиканні й посиленні струму в одній котушці в другій — наводиться струм протилежного напрямку; при розмиканні або ослабленні — наводиться струм однакового напрямку з навідним струмом.

Як же треба змінити правило Ленца для того випадку, коли індукція виникає без переміщення провідників?

Нарисуємо напрям силових ліній навідного і наведеного струмів для двох котушок, з яких зовнішня буде навідною (рис. 139, а, б).

Навідний струм позначено на рисунку суцільним колом, наведений — пунктирним. Силкові лінії навідного струму направлені від читача. Струм, наведений при замиканні або посиленні наведеного струму, утворює поле, силкові лінії якого направлені до читача,

тобто ослаблюють навідне поле. Струм, наведений при розмиканні або ослабленні навідного струму, утворює поле, силіве лінії якого направлені від читача, тобто такі, що підтримують навідне поле.

Тому можна дати таке загальне формулювання правила Ленца: *в явищі індукції струмів поле індуктованого струму завжди направлене так, щоб зменшити зміни, що відбуваються з полем індукуючого струму.*

113. Індукція в суцільних тілах. Індукційні струми збуджуються не тільки в ізоляваному лінійному провіднику, а й у всякому масивному провіднику. Для цього треба тільки, щоб масивний провідник переміщався в магнітному полі. Струми в суцільних провідниках називаються струмами Фуко за ім'ям французького фізика, що відкрив їх. Якщо вставити всередину котушки металічний стрижень і пропустити через котушку струм від освітлювальної сітки, який весь час змінюється і величиною і напрямом, то стрижень швидко нагрівається. Його нагрівання пояснюється тепловою дією індукційних струмів Фуко, що проходять по ньому.

Якщо між дуже зближеними полюсами сильного електромагніта заставити коливатися маятник, на кінці стрижня якого прикріплена мідна пластинка, то маятник коливається доти, поки не замкнено струм, що живить електромагніт. При замиканні ж струму в обмотці електромагніта, пластинка починає перерізати силіве лінії поля; в ній індуктується струм, який, за правилом Ленца, заважає рухові, що його спричиняє, і маятник зупиняється (рис. 140).

Струми Фуко беруть на себе частину тієї механічної енергії, яка витрачається на збудження індукційних струмів у машинах, і марно розтрачують цю енергію на теплоту і зайвий опір; тому для усунення їх у машинах та інших приладах вживають особливих заходів.

В інших випадках струми Фуко використовуються для певних потреб. Наприклад, в електричних вимірних приладах рухомий магніт збуджує в навколишніх мідних частинах струми Фуко, які своїм впливом на магніт швидко припиняють його коливання.

Якщо в маятнику (рис. 140) зробити радіальні розрізи, то струми в такому куску збуджуються багатоманітніше; бо повітряні проміжки порушують цілість металічного куска і, отже, зменшують його провідність.

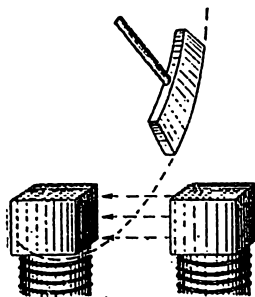


Рис. 140. Маятник для демонстрації струмів Фуко.

Індукційний струм. При замиканні струму в першому-ліпшому провіднику навколо нього виникає магнітне поле, при розмиканні воно зникає. Отже, можна сподіватися виникнення ЕРС індукції в самому провіднику при замиканні і розмиканні в ньому струму.

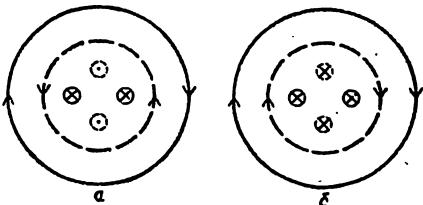


Рис. 139а. а — при замиканні або підсиленні індукуючого струму магнітне поле індукційного струму *ослаблює* поле індукуючого; б — при розмиканні або послабленні індукуючого струму магнітне поле індукційного струму *підтримує* поле індукуючого.

114. Самоіндукція. При всякій зміні магнітного поля в просторі, охоплюваному провідником, у провіднику виникає індукційний струм. При замиканні струму в першому-ліпшому провіднику навколо нього виникає магнітне поле, при розмиканні воно зникає. Отже, можна сподіватися виникнення ЕРС індукції в самому провіднику при замиканні і розмиканні в ньому струму.



Збудження ЕРС індукції в провіднику при зміні в ньому величини струму відкрив Фарадей в 1835 р. і назвав самоіндукцією.

Самоіндукція полягає в тому, що:

при замиканні (або посиленні) струму в провіднику в ньому наводиться ЕРС самоіндукції, яка, за законом Ленца, протидіє зміні, що її спричиняє, тобто направлена протилежно замиканому струмові; при розмиканні або ослабленні струму в провіднику наводиться ЕРС самоіндукції, яка направлена однаково з розмиканням струмом.

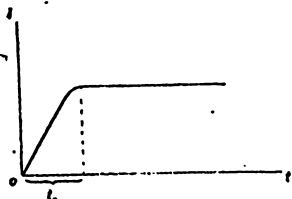


Рис. 141. Графік зміни величини струму з часом при самоіндукції.

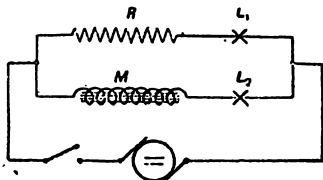


Рис. 142. Схема установки для демонстрації самоіндукції при замиканні.

Самоіндукція при замиканні виявляється в тому, що величина струму при замиканні не відразу досягає тієї величини, яка повинна бути в колі за законом Ома при даних напрузі й опорі провідників, і тому проходить більший чи менший відрізок часу (звичайно частини секунди), поки величина струму не досягне своєї повної величини. Поступове наростання величини струму пояснюється виникненням під час замикання струму протилежно направленої ЕРС самоіндукції (рис. 141).

Щоб виявити самоіндукцію при замиканні кола, треба постійний струм пустити по двох паралельних вітках: в одну вітку ввімкнути великий електромагніт  $M$  і послідовно з ним жарову лампочку  $L_2$ ; другу вітку скласти з прямолінійного провoda з таким же опором  $R$ , як і у електромагніта, і з такої ж лампочки  $L_1$ , як і в першій вітці (рис. 142).

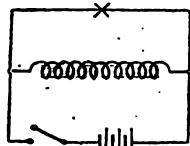


Рис. 143. Схема установки для демонстрації самоіндукції при розмиканні.

При замиканні постійного струму лампочка у вітці з електромагнітом розжарюється повільніше, ніж лампочка в колі лінійного провoda. Отже, у вітці з котушкою самоіндукції величина струму не відразу досягає своєї повної величини; цієї спробою виявляється самоіндукція при замиканні.

Щоб виявити самоіндукцію при розмиканні, можна спростити попередню установку: скласти коло з джерела постійного струму, обмотки дуже великого електромагніта і паралельно електромагнітові ввімкнути жарову лампочку (рис. 143). При вимкненні джерела струму лампочка на мить спалахує;

це показує, що через неї проходить струм самоіндукції, що виник в обмотці електромагніта при розмиканні і знаходить для себе в одній вітці розгалуження замкненої шлях.

Самоіндукція при розмиканні виявляється іскрою у місці розмикання. При розмиканні може виникнути така велика ЕРС індукції, тобто така напруга в місці розриву, що повітря стає провідником і через нього проходить іскровий розряд (§ 103).

Виникла іскра дуже псує прилади, тому при розмиканні сильних струмів у приладах, де явище самоіндукції виявляється дуже сильно, перед розмиканням поступово ослаблюють струм; самі ж виникачі звичайно занурені в добрі ізолятори, наприклад у масло.

Явище самоіндукції нагадує явище інерції.

Відомо, що паровоз, коли на поршень у циліндрі починає діяти сила тиску пари, не відразу набирає тієї швидкості, з якою він надалі рухається рівномірно. Навпаки, після припинення дії рушійної сили пари паровоз не зупиняється відразу, а продовжує зберігати швидкість.

Осердя з м'якого заліза в електромагніті відповідає маховому колесу теплового двигуна. При замиканні струму частина енергії, відданої джерелом струму, іде на створення магнітного поля, яке завдяки наявності залізного осердя є великим. Тільки решта енергії іде на перемагання опору і на джоулеве тепло. При розмиканні ж кола струм підтримується за рахунок енергії, запасеної у магнітному полі.

Отже, самоіндукція і інерція струму та його магнітного поля — тільки два різних вирази для однієї і тієї ж властивості.

При одній і тій же величині замкненого і розмиканого струму і при одній і тій же швидкості замикання і розмикання струму ЕРС самоіндукції різна в різних провідниках; вона дуже мала в прямолінійних провідниках і котушках, обмотаних біфілярною (подвійною) обмоткою (рис: 144); в котушках же з звичайною обмоткою вона може бути значною, зростаючи пропорційно квадратові числа витків і площі перерізу котушки. Наявність у котушці залізного осердя значно збільшує ЕРС самоіндукції.



Рис. 144. Біфілярна обмотка.

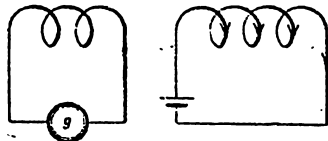


Рис. 145.

#### Вправа 15.

1. Північний кінець магніта опускається в отвір котушки, обмотаної витками замкненого дроту. Який напрям індукційного струму? Визначити його за правилом Флемінга і перевірити за правилом Ленца або навпаки.

2. Те саме запитання, якщо північний полюс виймається з котушки.

3. Те саме запитання, якщо опускається в котушку південний полюс.

4. Те саме запитання, якщо виймається з котушки південний полюс.

5. Котушка, замкнена через гальванометр, наближається або віддаляється від другої котушки, по якій тече струм (рис. 145). Визначити напрям індукційного

струму при зближенні і віддаленні котушок для двох протилежних напрямів індукуючого струму.

6. Чи наводиться струм у котушці, замкненій через гальванометр, якщо при нерухомому положенні обох котушок у навідній котушці замикати, посилювати, зменшувати, розмикати струм? Якщо струм індукуватиметься, то визначити його напрям для кожного випадку при двох можливих напрямках струму в індукуючій котушці.

7. Чи зміниться явище індукції, і якщо зміниться, то як і чому, якщо в індукційну котушку вставити залізне осердя?

8. Нарисувати напрями індукційних струмів при зближенні і віддаленні кіл, зображених на рис. 145а, після замикання верхнього кола.

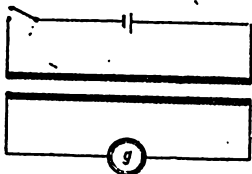


Рис. 145а.

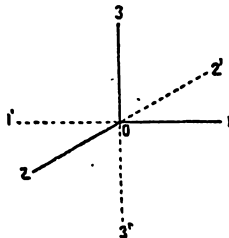


Рис. 146. До задачі 11 вправи 15 - ої.

9. Якого напрямку струм наведеться в замкнутій спіралі рисунка 106, якщо всувати й висувати зображений на рисунку магніт?

10. Якого напрямку струм наведеться в котушці рисунка 107, якщо вона буде замкнена, і якщо всувати і висувати зображений на рисунку електромагніт?

11. Якого напрямку струм індуктується у рухомій ділянці кола, якщо провідник має напрям  $2-2'$ , магнітна силова лінія має напрям  $0-3$ , а рух провідника —  $0-1$  (рис. 146)?

Те саме запитання для випадків:

$$\begin{array}{l} 1-1'; \quad 0-2'; \quad 0-3. \\ 3-3'; \quad 0-1'; \quad 0-2'. \\ 3-3'; \quad 0-2'; \quad 0-1. \\ 2-2'; \quad 0-1'; \quad 0-3'. \end{array}$$

12. У якому напрямі треба рушити провідник  $1-1'$ , щоб дістати в ньому індукційний струм у напрямі  $0-1$ , якщо магнітна силова лінія направлена по лінії  $0-3'$ ?

13. Який має бути напрям магнітних силових ліній, щоб при русі в напрямі  $0-1'$  мати індукційний струм у напрямі  $0-2'$ ?

14. Чому еталони опору виготовляються з біфілярного дроту?

15. Простежити, як мінятиметься напрям індукційного струму, якщо опустити північний (або південний) полюс магніта всередину котушки з одного боку і виймати магніт з другого боку північним (або південним) полюсом.

16. Чи з однаковим прискоренням падає магніт через вертикальний отвір котушки, обмотаної провідником, в тому випадку, коли провідник не замкнено і коли замкнено?

17. Між полюсами підковоподібного магніта вміщено дротяний провідник у формі прямокутника так, що площа його перпендикулярна до силових ліній. Чи наводиться струм, якщо цей провідник зробіть повний оберт навколо осі, яка збігається з середньою лінією прямокутника? Якого напрямку?

18. Одного разу всередині площі, охопленої провідником, створилось 1 000 000 силових ліній за 5 секунд, другий раз в тій самій площі зникло 600 000 силових ліній за 4 секунди. В якому випадку ЕРС індукції більша?

19. Дротяна рама у формі прямокутника однією своєю стороною суміщається з прямолінійною ділянкою кола струму і робить навколо цієї сторони повний оберт. Чи індуктуватиметься струм під час цього руху?

20. Якщо вмістити дротяний прямокутник у площині магнітного меридіана і рухати його в цій площині, то чи наводиться в ньому струм?

21. Якщо поставити дротяний прямокутник перпендикулярно до площини магнітного меридіана і рухати його вздовж меридіана, то чи наводиться струм? Якщо рухати перпендикулярно меридіану, то чи наводиться струм?

22. Як треба рухати в полі змінного магнетизму дротяний прямокутник, щоб у ньому наводився струм?

23. Дротяний прямокутник ставиться перпендикулярно до силових ліній однорідного поля. В якому випадку буде найбільша ЕРС індукції: коли прямокутник рухається вздовж силових ліній, перпендикулярно до них чи похило до них?

24. Чому проводи телефона не слід підвішувати на одних стовпах з проводами змінного струму для освітлення?

### ЗАПИТАННЯ.

1. Яка основна умова виникнення індукції в усіх випадках?
2. Чи виникає ЕРС індукції, коли провідник ковзає вздовж силових ліній?
3. Від чого залежить величина ЕРС індукції?
4. У чому полягає правило Флемінга для напрямку індукційного струму?
5. У чому полягає правило Ленца для індукції струмів?
6. Які напрями індукційних струмів при індукції магнітом?
7. Які напрями індукційних струмів при індукції струмами?
8. Що таке струми Фуко і який їх шкідливий вплив?
9. У чому полягає явище самоіндукції?
10. Від чого залежить величина ЕРС самоіндукції?

115. Індукційний генератор. На явищі індукції струмів заснована будова особливого виду джерел струму.

Машину, що перетворює з допомогою індукції механічну енергію в електричну, можна назвати індукційним генератором електричного струму (рис. 147).

В індукційному генераторі — дві головні частини: 1) електроманіт (або магніт), що утворює магнітне поле, яке індуктує струми; ця частина називається індуктором; 2) провідник, в якому індуктується струм; ця частина називається якорем.

На осі якоря поміщаються або контактні кільця або пластинчастий колектор, до яких притискаються щітки, сполучені з кінцями робочого кола.

116. *Лабораторна робота 5.* Спостереження індукційних струмів у витках дроту, що обертаються в однорідному магнітному полі.

Прилади: 1) сильний підковоподібний магніт; 2) гальванометр; 3) мала котушка у формі прямокутника на кілька сотень витків тонкого дроту, яка вміщується між полюсами магніта.

Хід роботи. 1. Сполучити кінці витків дроту з гальванометром і помістити витки між полюсами магніта так, щоб площина їх була перпендикулярна до силових ліній.

2. Повертаючи витки навколо осі, що проходить через середину прямокутника паралельно більшій стороні його, на першу чверть оберту, спостерігати за гальванометром. В якому напрямі виникає струм? Зверити відмічений за гальванометром напрям індукційного струму з напрямом його за правилом правої руки.

3. Провести такі ж спостереження, продовжуючи обертати на другу, третю, четверту чверті оберту.

4. Який висновок із спроби можна зробити про напрям індуктованих струмів при одному повному оберті витка? Чи одного напрямку струм індуктується

під час обертут? Скільки змін напруги струму відбувається за час одного обертут? В яких положеннях витка відносно силових ліній відбувається зміна напруги? 5. Перевірити попередні висновки, починаючи обертання від інших положень. 6. Як впливає на явище індукції швидкість обертання?

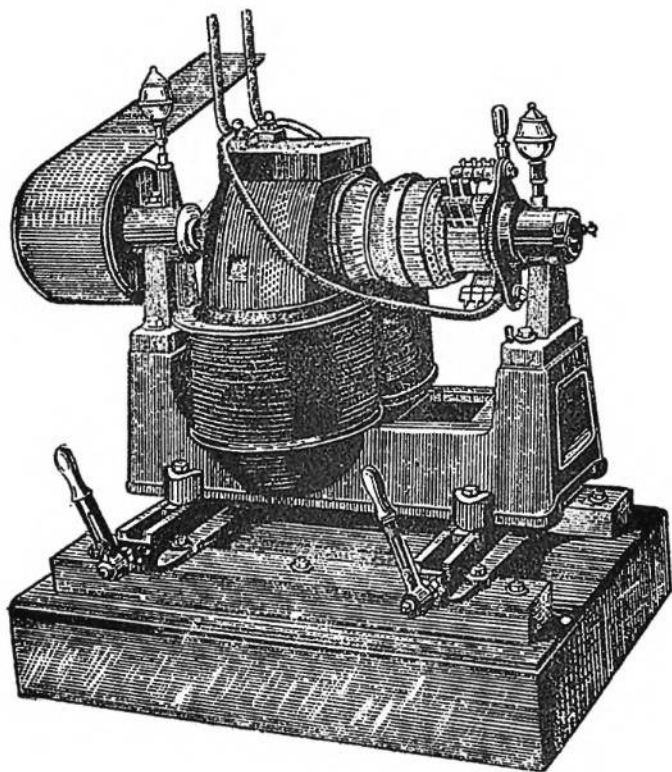


Рис. 147. Генератор.

**117. Індукція струму в якорі.** Щоб зрозуміти індукцію струму в обмотці якоря при обертанні його в полі індуктора, досить вибрати з усієї обмотки якоря один виток і розглянути явище, що відбувається при одному обертті. Нехай на рисунку 148 *N* і *S* зображають полюси індуктора. Вмістимо один прямокутний обмотки якоря перпендикулярно до силових ліній поля, позначивши це положення знаком  $\perp$ .

При повертанні прямокутника навколо осі на чверть оберту з положення *I* в положення *II* сторони *cd* і *ef* перетинають силові лінії, через що в них індуктується ЕРС. Сторона *cd* при цьому обертанні переміщається вниз, сторона *ef* піднімається вгору. Застосовуючи правило правої руки, можна зміркувати, що в стороні *cd* ЕРС буде направлена від *d* до *c*, в стороні *ef* — від *f* до *e*. На другій чверті оберту від положення *II* до положення

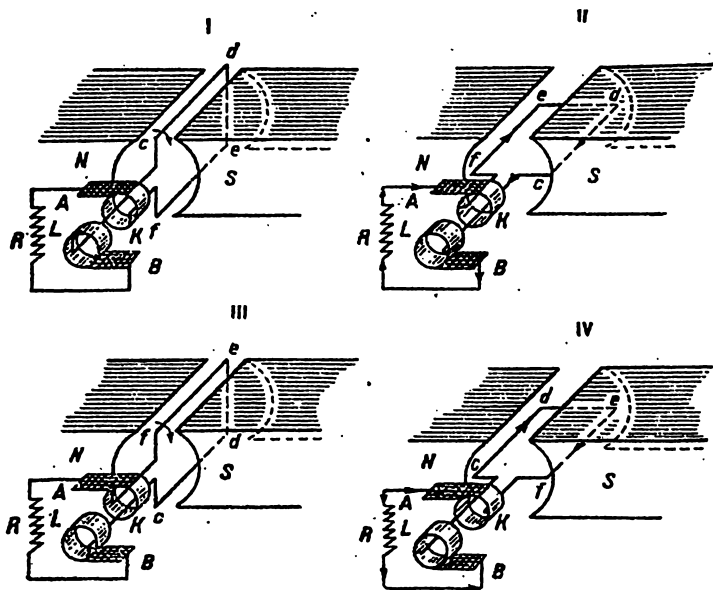


Рис. 148.

*III* рух сторін продовжується в тому ж напрямі, тому ЕРС індукції зберігає в прямокутнику той самий напрям *fedc*. При переході прямокутника з положення *III* в положення *IV* і далі в *I* змінюється напрям руху сторін (*cd* піднімається, *ef* опускається), тому і ЕРС індукції змінює свій напрям на протилежний — від *c* до *d* і від *e* до *f*. Зміна напрямку відбувається двічі під час оберту в положеннях *I* і *III*, коли площина витка встановлюється перпендикулярно до силових ліній поля. В цих положеннях ЕРС індукції перетворюється в нуль. Тому площина, перпендикулярна до силових ліній, називається нейтральною площиною.

Отже, при обертанні кожного витка обмотки якоря в магнітному полі протягом першої половини оберту, беручи від нейтральної площини, індуктується ЕРС в одному напрямі, протя-

гом другої половини — в протилежному (коли площина витка збігається з нейтральною площиною, ЕРС обертається в нуль).

Математичний розрахунок показує, що *найбільшу швидкість перетину силових ліній* маємо в положеннях II і IV.

В цих положеннях довгі сторони прямокутника перетинають силові лінії в перпендикулярному до них напрямі, тому число перетинаних ліній за одну секунду буде найбільше, і ЕРС індукції досягає своїх найбільших значень. В положеннях же I і III сторони прямокутника ковзають уздовж силових ліній; отже, перетину ліній провідником зовсім не буває, і ЕРС індукції дорівнює нулеві.

Через те що ЕРС індукції виникає в кожному витку дроту і при послідовному сполученні витків їх ЕРС додаються, то в машинах для одержання великої ЕРС поміщається не один виток дроту, а значна кількість їх.

Сукупність витків дроту разом з твердим остовом, на якому вони намотані, становить ту частину машини, яка називається якорем.

**118. Якір.** В сучасних машинах застосовується якір у формі циліндра, що називається барабанним якорем (рис. 149). Барабанний якір складається з осердя, складеного з ізованих один від одного листів м'якого заліза. На цьому барабані уздовж



Рис. 149. Барабанний якір.

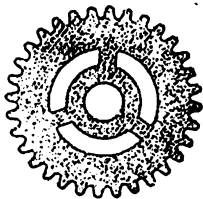


Рис. 150. Штампований лист осердя.

його твірних міститься обмотка з ізованого мідного дроту, яка складається з великої кількості витків. Кожний виток дроту має приблизно форму прямокутника. М'яке залізо вибирається через те, що воно втягує в себе силові лінії магнітного поля індуктора, не даючи їм розсіюватися в повітрі. Від цього збільшується число силових ліній, перетинаних обмоткою якоря, і, отже, зростає ЕРС індукції.

Якір робиться не з суцільного куска заліза, а з ізованих листів, щоб усунути струми Фуко вздовж твірних циліндра.

Щоб зменшити повітряний проміжок між полюсами індуктора і осердям, обмотка накладається в спеціальних пазах, через що листи осердя штампуються за спеціальними формами, один з видів яких зображено на рисунку 150.

Кінці обмотки прилучаються до двох так званих контактних кілець  $K$  і  $L$ , насаджених на вісь ізовано від неї і одне від одного (рис. 148).

До кілець з допомогою пружин притискаються щітки  $A$  і  $B$ ,

які складаються з вугілля, спресованого з мідною сіткою. До затискачів щіток прилучається зовнішня дільниця кола, куди вмикаються споживачі енергії. З допомогою щіток здійснюється так званий ковзний контакт зовнішнього (робочого) кола з якорем. У зовнішньому колі під час кожного оберту якоря двічі міняється напрям струму, як видно з рисунка 148.

Описана машина дає струм, величина і напрям якого міняються через певні відрізки часу і який називається змінним струмом.

Найменший час, після якого щоразу починається точне повторення процесу змін струму за величиною і напрямом, називається періодом.

В машині, схема якої була розглянута вище, період змінного струму збігається з часом одного оберту якоря.

Зміну ЕРС струму можна зобразити графічно, якщо на осі абсцис відкладати рівні частини періода (наприклад, чверті або шістнадцяті частини), а на ординатах відкладати (в умовному масштабі і у відповідному напрямі) відрізки, що зображають величини і напрями ЕРС. В найпростішому випадку побудована таким способом лінія має форму кривої, що називається синусоїдою (рис. 151).

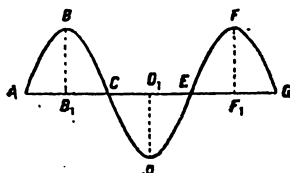


Рис. 151. Синусоїда ЕРС змінного струму.

### 119. Генератори змінного струму.

Змінний струм має дуже широке застосування в освітленні і в електричних двигунах. Тому машини змінного струму постійно застосовуються в промисловості.

Індуктором генератора змінного струму є електромагніт, живлений постійним струмом з якогонебудь стороннього джерела, найчастіше від генератора постійного струму, насадженого на одну вісь з якорем машини змінного струму.

Через те що такі машини звичайно виготовляються для дуже великих напруг, то необхідно усунути контактні кільця і щітки. Для цього роблять нерухомим якір, прилучаючи до затискачів його кінці робочого кола; індуктор же роблять рухомим. Тоді якір називається статором<sup>1</sup>, а індуктор ротором<sup>2</sup>.

Машина змінного струму називається альтернатором.

Умовне зображення машини змінного струму на схемах подано на рис. 167.

120. Машини постійного струму. Для хімічних дій і в деяких випадках для живлення моторів (наприклад трамвайних) треба застосовувати постійний струм.

Випростування змінного струму робиться з допомогою колектора спеціальної будови.

В найпростішому вигляді такий колектор складається з двох половин кільця (півкільцевий колектор), ізольованих одна від

<sup>1</sup> Від латинського слова *stare* (stare) — стояти.

<sup>2</sup> Від латинського слова *rotare* (rotare) — обертати.



одної і від осі. Один кінець обмотки сполучається з одним півкільцем, другий — з другим. Щітки притискаються до колектора по лініях, що лежать у нейтральній площині. В ті моменти, коли змінюється напрям ЕРС в обмотці, відбувається і зміна півкілця, що доторкаються до тієї й другої щітки, і струм у робочому колі зберігає свій напрям, як видно з рисунків 152, а

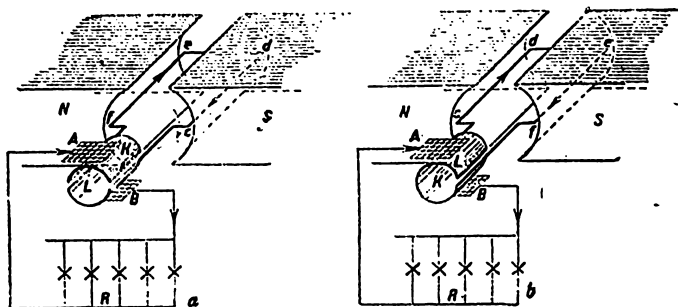


Рис. 152.

і 152, б. Тому одна з щіток машини постійного струму протягом усього часу роботи машини є позитивним полюсом її, друга — негативним.

Але значення ЕРС струму при півкільцевому колекторі двічі під час оберту перетворюється в нуль, досягаючи посередині проміжків між нульовими значеннями найбільших значень при одному й тому ж напрямі. Струм утворюється пульсуючий.

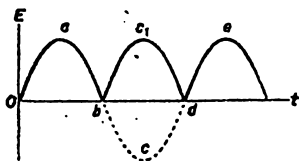


Рис. 153. Графік пульсуючого струму.

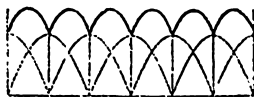


Рис. 154. Графік ЕРС, випро-  
стакої колектором при дво-  
х витках дроту на якорі (жирна  
лінія).

Його графік дано на рисунку 153. Щоб зменшити пульсацію, треба збільшити число прямокутних обмоток на барабані якоря. Тоді в кожній з них ЕРС індукційного струму перетворюється в нуль при проходженні через нейтральну лінію. Але спільна ЕРС кожної половини якоря по обидві сторони від нейтральної лінії вже не доходить до нуля. Якщо взяти два послідовно сполучені прямокутники, сторони яких рівномірно розподілені по якорю, то зміна величини струму в колі зобразиться товстою лінією графіка на рисунку 154.

Зміни ЕРС у кожному прямокутнику зображаються однією і тією ж кривою; тільки самі криві зміщуються на чверть періода (зміни запізнюються). Загальна величина ЕРС графічно в кожний момент утворюється через складання ординат усіх кривих.

Окремі обмотки якоря називаються секціями. Чим більше число секцій, тим менша зміна величини струму в колі. Звичайно роблять близько 100 секцій; цим досягається майже повна постійність струму. Секції виготовляються за готовим шаблоном (рис. 155) і вкладаються в пази якоря.

При секційній обмотці колектор робиться пластинчастим (рис. 149). Число пластин колектора дорівнює числу секцій. До кожної пластинки колектора прилучається кінець однієї секції і початок дальшої (рис. 156). Через пластинки секції кожної половини якоря сполучені послідовно; через щітки обидві половини сполучені між собою паралельно.

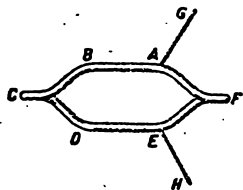


Рис. 155. Шаблон секції.

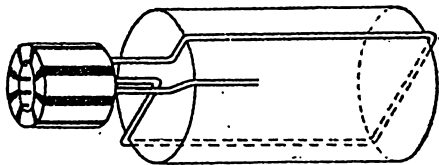


Рис. 156. Модель пластинчастого колектора.

**121. Динамомашини.** Динамомашиною називається машина постійного струму, індуктором якої служить електромагніт, живлений тим же струмом, який виробляється самою машиною.

Живлення електромагніта струмом від самої машини називається самозбудженням; самозбудження застосував уперше німецький інженер Сіменс у 1867 р.

Самозбудження полягає ось у чому. Перед випуском машини з заводу через обмотки електромагніта пропускається струм. Залізне осердя електромагніта залишає сліди залишкового магнетизму. Цих слідів магнітного поля досить для того, щоб при першому оберті якоря навести в обмотці його і в колі дуже малий індукційний струм. Якщо пропустити цей струм також через електромагніт машини (індуктор), то він підсилить магнітне поле: підсилене ж поле збільшує величину струму, і так ітима далі взаємне посилення до якоїсь границі, яка залежить від загальної будови машини і способу сполучення з якорем обмотки електромагніта.

Способом приєднування до кола обмотки індуктора динамомашини поділяються на три види:

**1. Серієсна машина.** Якщо обмотка індуктора послідовно сполучається з робочим колом, то машина називається серієс<sup>1</sup> (рис. 157). Серієсна машина не дає напруги, поки розімкнене зовнішнє коло.

<sup>1</sup> Серієс — по англійському значить ряд.

2. *Шунтова машина.* Якщо обмотка індуктора прилучається до затискачів щіток паралельно робочому колу, то машина називається шунтовою (рис. 158).

Шунтова машина може працювати при розімкненому робочому колі; тоді весь струм проходить через обмотки індуктора. При ввімкненні робочого кола струм якоря поділяється на дві частини: одну — що проходить по індуктору, другу — що йде в робоче коло. Ці частини обернено пропорціональні опорам паралельних віток.

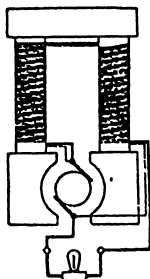


Рис. 157. Схема обмотки індуктора серієс-машини.

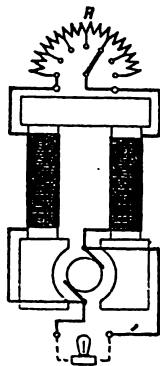


Рис. 158. Схема обмотки індуктора шунтової машини.

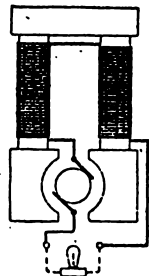


Рис. 159. Схема обмотки індуктора компаунд-машини.

3. *Компаунд-машина.* Якщо зробити дві обмотки на індукторі і ввімкнути одну *послідовно* з робочим колом, як у серієсній машині, другу *паралельно* їй, як у шунтовій, то така машина називається компаунд<sup>1</sup> (рис. 159).

122. Коефіцієнт корисної дії динамомашини. Корисною потужністю машини називається добуток напруги у зовнішній частині кола  $U$  на величину струму  $I$  в ній. Повною потужністю називається добуток ЕРС якоря  $E$  на величину струму в якорі  $I_a$ .

Електричним коефіцієнтом корисної дії, або електричною віддачею,  $\eta_e$  називається відношення корисної потужності до повної.

Для серієсної машини: 
$$\eta_e = \frac{UI}{EI} = \frac{U}{E}. \quad (XXa)$$

Для шунтової машини: 
$$\eta_e = \frac{UI}{EI_a}. \quad (XXб)$$

Якір всякої машини приводиться в рух двигуном індуктора, потужність якого на валу  $N$  більша, ніж потужність у якорі динамо-

<sup>1</sup> Компаунд — по-англійському значить мішаний.

машини, бо частина її витрачається на перемагання тертя в підшипниках.

*Промисловим коефіцієнтом корисної дії, або промисловою віддачею,  $\eta$  називається відношення корисної потужності до потужності двигуна*

$$\eta = \frac{UI}{N}$$

(XXV)

Приклад. В шунтовій машині напруга на затискачах дорівнює 120 вольтам і величина струму в зовнішньому колі — 48 амперам. Величина струму в індукторі  $I_1$  дорівнює 2 амперам. Опір якоря 0,15 ома. Знайдемо електричну віддачу і потужність двигуна, якщо промислова віддача  $\eta = 0,85$ .

Корисна потужність  $N_1 = UI = 120 \cdot 48$  ват = 5760 ватам.

$$I_x = I + I_1 = 48\text{A} + 2\text{A} = 50 \text{ амперам.}$$

Замість обчислення ЕРС машини в цій задачі простіше розрахувати повну потужність, як суму потужностей у якорі, індукторі і зовнішньому колі.

Потужність у якорі:

$$N_2 = I_x^2 \cdot r_x = 50^2 \cdot 0,15 \text{ ват} = 375 \text{ ватам.}$$

Потужність в індукторі:

$$N_3 = I_1 \cdot U = 2 \cdot 120 \text{ ват} = 240 \text{ ватам.}$$

Повна потужність:

$$N = N_1 + N_2 + N_3 = 5760 + 375 + 240 = 6375 \text{ ватам.}$$

Електрична віддача:

$$\eta_e = \frac{5760}{6375} = 0,93.$$

Промислова віддача:  $\eta = \frac{UI}{N}$ ;

$$N = \frac{UI}{\eta}; \quad N = \frac{5760}{0,85 \cdot 736} \text{ КС} = 9,2 \text{ КС.}$$

В найновіших машинах постійного струму великих розмірів промислова віддача досягає 90% і електрична віддача — 95% при повному навантаженні, тобто, коли струм у зовнішньому колі досягає найбільшої допустимої величини.

123. Багатополюсні машини. Для кожної машини існує певна швидкість обертання, необхідна для досягання нею найбільшої потужності.

Щоб і при меншій швидкості мати ту ж величину ЕРС, як і при більшій, можна збільшити число полюсів, заставивши кожну дротину якоря проходити протягом оберту не перед двома полюсами, а перед більшою кількістю їх.

Так, при чотирьох полюсах індуктора у кожному витку обмотки ЕРС пройде під час одного оберту чотири рази через значення, рівне нулеві. Тому її зміна під час одного оберту відповідатиме зміні ЕРС за два оберти при двох полюсах. Отже, для досягнення того ж результату при чотирьох полюсах досить

швидкості обертання вдвоє меншої, ніж при двох полюсах; при шести полюсах — втрое меншої і т. д. (при однакових інших умовах). Рисунок 160а і 160б зображають чотириполюсну динамо-машину.

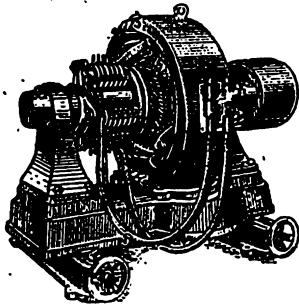


Рис. 160а. Чотириполюсна машина.

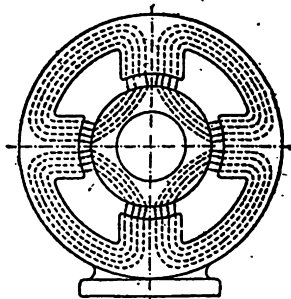


Рис. 160б. Схема чотириполюсної машини.

124. Магнето. Першими щодо часу винайдення були машини, в яких індуктором був постійний магніт. Вони мали назву магніто-електричних машин.

Але через те що електромагніти можуть давати сильніші магнітні поля, ніж постійні магніти, то з відкриттям принципу самозбудження такі машини на електростанціях були витіснені динамомашинами. Магніто-електричні машини застосовуються тепер в таких випадках, коли потрібна невелика величина струму, наприклад, у колі викличних дзвоників для телефонних апаратів деяких систем або для одержання запальної іскри для запалювання горючої суміші в двигунах внутрішнього згорання.

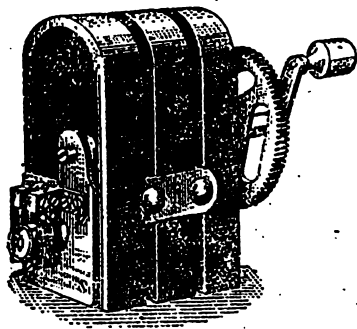


Рис. 161. Магнето.

Такі невеликі магніто-електричні машини дістали назву магнето. Рисунок 161 дає зображення магнето від телефонного апарата <sup>1</sup>.

**Вправа 16.**

1. Чому дорівнює напруга коло затискачів динамомашини з послідовним збудженням, якщо вона повинна працювати на зовнішнє коло, що споживає струм в 10 амперів? Опори обмоток якоря і індуктора становлять разом 4 оми; ЕРС якоря дорівнює 440 вольтам. Відп. 400 вольтів.

2. Знайти електричну віддачу в попередній задачі. Відп. 0,91.

<sup>1</sup> Телефонні магнето називаються також індукторами.

3. Яка потужність у кіньських силах має бути затрачена на обертання динамомашини, що доставляє струм у 20 амперів при напрузі на затискачах в 65 вольтів, якщо промислова віддача її дорівнює 0,84? Відп. 2,1 КС.

4. Опір  $r_1$  обмотки індуктора шунтової динамомашини дорівнює 23 омам. Визначити величину струму  $I_d$  в якорі, якщо напруга на затискачах динамо дорівнює 115 вольтам, а величина струму в зовнішньому колі дорівнює 121 амперу. Відп. 126 амперів.

5. Визначити напругу між затискачами шунтової машини і опір обмоток індуктора, якщо якор розвиває ЕРС в 116 вольтів, величина струму в зовнішньому колі дорівнює 32 амперам, в обмотці індуктора рівна 1,35 ампера, опір якоря дорівнює 0,18 ома. Відп. 110 вольтів; 81,5 ома.

6. Знайти електричну віддачу в попередній задачі. Відп. 0,91.

7. Напруга між затискачами шунтової динамомашини дорівнює 110 вольтам, величина струму в якорі — 47,5 ампера, в зовнішньому колі — 45 амперів, опір якоря — 0,1 ома. Знайти електричну віддачу машини і потужність двигуна, що приводить у рух якор, якщо промислова віддача дорівнює 0,85. Відп. 0,91.

8. Який струм пройде по обмотках машини (задачі 1), якщо її замкнути накоротко (наприклад опором в 0,001 ома)? Що з нею може статися?

Відп.  $\approx 110$  амперів.

9. Який струм пройде по обмотці індуктора машини в задачі 4, якщо її замкнути накоротко (наприклад опором в 0,001 ома)? Що станеться з нею?

10. Чому в машинах змінного струму не застосовується самозбудження?

11. Шунтова машина, у якої опір якоря  $r_a = 0,04$  ома і опір індуктора  $r_i = 20$  омам, дає в робочому колі величину струму  $I = 30$  амперам при напрузі в 65 вольтів. Знайти: 1) величину струму в індукторі; 2) величину струму в якорі; 3) ЕРС якоря; 4) теплову втрату в індукторі; 5) електричний коефіцієнт корисної дії. Відп. 3,25 ампера; 33,25 ампера; 66,33 вольтів; 0,88.

### ЗАПИТАННЯ.

1. З яких головних частин складається генератор?
2. Яку форму має якор машини?
3. З якого матеріалу робиться осердя якоря? Чим зумовлюється вибір матеріалу?
4. Як усуваються струми Фуко в якорі?
5. В яких напрямках наводиться струм у рамі, що обертається в магнітному полі?
6. При яких положеннях рами ЕРС індукції перетворюється в нуль?
7. Що називається змінним струмом?
8. Що називається періодом змінного струму?
9. Скільки разів міняє струм свій напрям протягом періода?
10. В яких положеннях обертової рами ЕРС досягає свого найбільшого значення? чому?
11. Який вигляд має графік ЕРС змінного струму?
12. Як називаються машини змінного струму?
13. Що таке статор? ротор?
14. Як відбувається в машині перетворення змінного струму в постійний?
15. Чому буває пульсація струму в машині постійного струму?
16. Як усувається пульсація?
17. Що таке секція якоря?
18. Як окремі секції сполучаються одна з одною?
19. Що таке пластинчастий колектор і для чого він робиться?
20. У чому полягає самозбудження машини?
21. Що називається динамомашинною?
22. Коли динамомашинна називається серісною? шунтовою? компаунд?
23. Нарисуйте схеми сполучення обмоток індуктора і якоря в кожному типі динамомашини.
24. Що називається корисною потужністю динамо?
25. Що називається повною потужністю динамо?
26. Що називається електричною віддачею машини?
27. Що називається промисловою віддачею машини?

**125. Електромотори.** Машини, що перетворюють електричну енергію в механічну, називаються електромоторами.

Електромотори мають великі переваги перед іншими видами двигунів. Вони виключають потребу застосовувати громіздкі трансмісії (рис. 162), вводяться в загальне коло зручно і непомітно прокладуваними проводами, займають мало місця без-

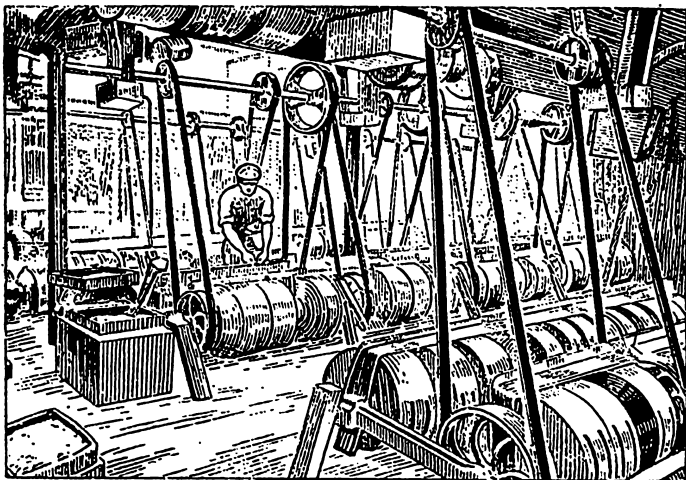


Рис. 162. Пасові трансмісії.

печні, в перший-ліпший момент їх можна пустити в хід, споживають енергію пропорціонально виконуваній роботі, можуть обслуговувати кожен окрему машину і при недіянні інших, допускають невелике дробіння потужності (наприклад, до 0,1 КС в електричних вентиляторах), можуть бути розміщені в будь-яких приміщеннях, чого не можна зробити при теплоустановках, і незамінні при роботах, небезпечних в пожежному відношенні, наприклад у шахтах.

З того часу, як динамомашини стали давати електричну енергію величезної потужності, електромотори почали широко застосовуватися в промисловості. Трамваї становлять більшу частину громадського міського транспорту; електровози починають проникати і на залізниці; крани на заводах для переміщення вантажів, ліфти в жилих будинках і складах, підйоми на військових суднах для подавання снарядів приводяться в рух електромоторами. Мотори, сполучені пасовою передачею з окремими фабричними верстатами або навіть безпосередньо насажені на вал машини, можуть приводити в рух всі машини будь-якої величезної фабрики і заводу (рис. 163). В сільських

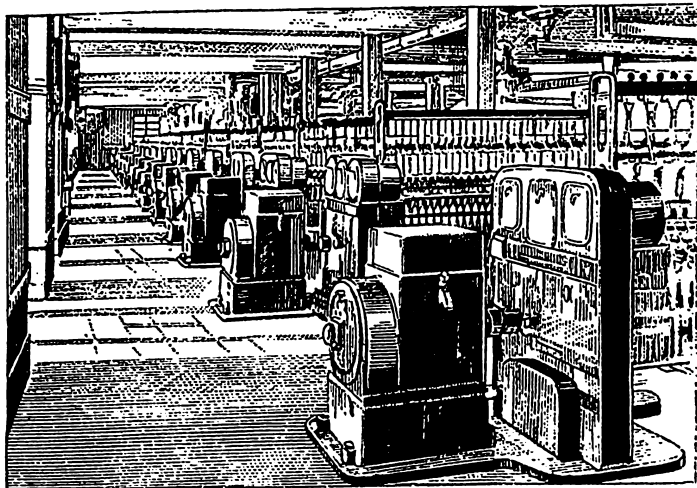


Рис. 163. Електричне устаткування печу.

місцевостях електромотор може бути прилучений до плуга, молотарки, віялки, млина, молочних сепараторів і до інших численних землеробських і сільськогосподарських знарядь. Електромотори працюють на постійному і змінному струмі.

**126. Електромотор постійного струму.** Якщо пустити струм із стороннього джерела через щітки в якір динамомашини, магнітне поле якої збуджене, то якір обертається. Справді, нехай через прямокутну обмотку проходить із зовнішнього джерела струм такого напрямку, як показано на рисунку 164. Тоді рухома рама під впливом магнітного поля піде в рух, напрям якого визначиться за правилом лівої руки.

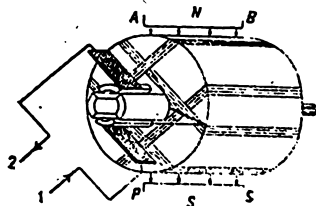


Рис. 164. Схема пуску струму в електромотор.

При багатьох секціях обмотки механічна дія посилюється; якір буде обертатися, поки надходить у нього струм. При цьому при заданому напрямі силових ліній і струму напрям обертання якоря протилежний тому напрямові, в якому слід його обертати, щоб такий самий струм давала динамомашинна.

Отже, динамомашинна, дістаючи механічну енергію, дає електричну; дістаючи електричну — дає механічну.



Через те що якір мотора обертається в магнітному полі, то в ньому так само, як і в якірі динамомашини, збуджується ЕРС індукції, яка за правилом Ленца протилежна ЕРС того струму, який приводить якір у рух. Ця ЕРС називається протиелектрорушійною силою. Її величина залежить від швидкості обертання якоря, тобто від навантаження мотора, і завжди зменшує напругу на затискачах мотора від пусканого в нього струму.

127. **Зміна напрямку обертання якоря мотора.** Як легко уявити через застосування практичного правила лівої руки, напрям руху провідника з струмом може змінитися, якщо зміниться або напрям струму в обмотці якоря, або напрям силових ліній магнітного поля індуктора. При одночасній же зміні того й другого напрям руху провідника залишається незмінним. Тому, якщо треба змінити напрям обертання якоря мотора, то досить змінити напрям струму або в обмотці якоря, або в обмотці індуктора.

128. **Коефіцієнт корисної дії електромоторів.** Якщо позначити напругу на затискачах мотора через  $U$ , а повний струм, що проходить через мотор, через  $I$ , то повна електрична потужність, споживана електромотором, виразиться через

$$N = IU.$$

З цієї потужності частина витрачається на нагрівання обмоток — якірної і індуктора; тому потужність, розвивана якорем, буде менша від тієї, що споживається, на величину потужності, обчислюваної за формулою Джоуля.

Позначимо розвивану якірну потужність через  $N_1$ .

*Відношення розвиваної якорем потужності до повної потужності, споживаної мотором, називається електричним коефіцієнтом корисної дії, або електричною віддачею мотора:*

$$\eta_e = \frac{N_1}{N}.$$

Але частина потужності, розвиваної якорем, витрачається на перемагання механічних опорів і втрат, на намагнічування і розмагнічування заліза осердь. Ця частина потужності приблизно однакова при роботі мотора з навантаженням і без навантаження, вхолосту, через що її і називають втратою холостого ходу. Віднявши цю останню від потужності якоря, одержимо ту дійсну, ефективну потужність, яку дає електромотор на валу. Позначимо останню через  $N_{ef}$ .

*Відношення корисної ефективної потужності на валу електромотора до споживаної ним потужності називається промисловою віддачею:*

$$\eta = \frac{N_{ef}}{N}.$$

Електродвигуни постійного струму мають електричну віддачу у межах від 70 до 92%, при чому в цілому віддача вища для потужніших двигунів. Віддача спадає при зменшенні навантаження і при перевантаженні.

## VI. ЗМІННИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ.

129. Синусоїдальна зміна ЕРС при обертанні витка в однорідному магнітному полі. Починаємо тепер докладніше вивчення властивостей змінного електричного струму.

Ми бачили вище (§ 117, 118), що під час обертання витка дроту в полі електромагніта утворюється змінний струм.

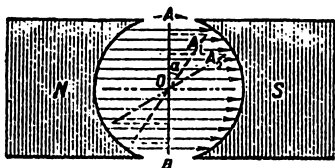


Рис. 165а.

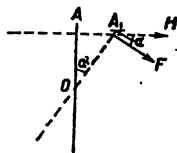


Рис. 165б.

В § 119 ми познайомилися в основних рисах з будовою генератора змінного струму.

Простежимо тепер, за яким законом змінюється ЕРС індукції під час рівномірного обертання витка дроту в однорідному магнітному полі. Нехай рисунок (165а) зображає переріз електромагніта  $NS$  і  $AB$  — переріз витка дроту, площина якого перпендикулярна до рисунка і до силових ліній поля. У розділі про електромагнітну індукцію (§ 109) було сказано, що ЕРС індукції прямо пропорційна синусу кута між напрямом руху провідника і напрямом силових ліній. В кожний момент сторона витка, яка проектується на площину рисунка у вигляді точок  $A, A_1, A_2, \dots$ , рухається з швидкістю, що направлена по дотичній до кола, наприклад у точці  $A_1$  (рис. 165б) в напрямі  $A_1F$ .

Кут  $\alpha$  між напрямом руху  $A_1F$  і магнітною силовою лінією  $H$  дорівнює куту  $A_1OA$  (кути з взаємно перпендикулярними сторонами). Отже, можна сказати, що ЕРС індукції при обертанні витка у магнітному полі прямо пропорційна синусу кута відхилення площини витка від нейтральної площини.

Виражений в радіанах кут повороту витка від положення, перпендикулярного до силових ліній, називається  $\phi$  або  $\theta$  змінної ЕРС.

Якщо позначити найбільше значення ЕРС індукції через  $E_0$ , то її значення в будьякий момент дорівнюватиме:

$$E = E_0 \sin \alpha.$$

Якщо  $\alpha = 0$  або  $\alpha = \pi$ , то  $E = 0$ ; сторона витка ковзає вздовж силових ліній, і індукції не буває. Тому положення  $AB$  і можна назвати нейтральним. Якщо  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ , то  $E = E_0$ ; сторона витка ріже в перпендикулярному напрямі силові лінії, і ЕРС буде найбільша; якщо  $\alpha = \frac{3\pi}{2}$ , то  $E = -E_0$ ; ЕРС індукції знову досягає свого найбільшого значення, але в протилежному напрямі.

Якщо обертання витка відбувається рівномірно, то кут  $\alpha$  можна виразити через кутову швидкість обертання  $\omega$  й час  $t$ , а саме  $\alpha = \omega t$ .

Кутова ж швидкість  $\omega$  виражається через період обертання  $T$  або число обертів за секунду  $\nu$  (частота обертання):

$$\omega = 2\pi\nu; \omega = \frac{2\pi}{T}; \alpha = 2\pi\nu t; \alpha = \frac{2\pi t}{T} \text{ і } E = E_0 \sin \omega t.$$

Генератори змінного струму звичайно роблять так, щоб період змінного струму  $T$  дорівнював  $\frac{1}{50}$  секунди. Тоді число змін напрямів струму за секунду дорівнюватиме 100.

Зрозуміло, що залежність між ЕРС індукції і частинами періода виражається тим самим графіком, що й залежність синуса від кута, тобто синусоїдою.

Така синусоїда зображена на рисунку 151.

На осі абсцис відкладені відрізки, що відповідають рівним частинам періода обертання; на осі ординат — значення ЕРС, що відповідають кінцям частин періода.

**130. Передача електричної енергії на віддаль.** Економніше жити електромотори різних фабрик струмом, вироблюваним на одній центральній станції, ніж будувати електростанції на кожній фабриці. Але в міру віддалення моторів і взагалі споживачів енергії від місця добування електричної енергії стають більшими втрати на нагрівання підвідних проводів. Зменшити цю втрату можна було б зменшенням опору провідника, тобто за рахунок збільшення перерізу провідника. Але в цьому випадку збільшується вартість матеріалу для провідників і для всієї установки. Тому техніка іде по шляху зміни величини струму.

Прилади, що перетворюють струми із зміною їх напруги, називаються трансформаторами.

Трансформатор називається підвищувальним, якщо з нього виходить струм з підвищеною напругою, і знижувальним, якщо виходить струм із зниженою напругою.

Завдання трансформування змінного струму при передачі на віддаль полягає ось у чому. Генератор струму при напрузі на затискачах в  $e$  вольтів і величині струму в  $I$  амперів дає потужність  $Ie$  ватів. Бажано цю потужність доставити споживачеві з найменшими втратами по дорозі; ці втрати пропорціональні  $I^2$ , отже, задача трансформації струму повинна полягати в перетворенні його в струм, величина якого  $i$  була б в багато разів менша, ніж  $I$ , але щоб не змінювалась передавана

потужність, напруга нового струму  $E$  має бути в стільки ж разів збільшена. Генератор дає потужність  $le$ ; ця потужність іде в трансформатор, де перетворюється в потужність  $Ei$ . В ідеальному випадку (відсутність втрат енергії в трансформаторі):

$$el = Ei.$$

Мала величина струму  $i$  дає малу втрату в проводах на джоулеве тепло. На місці споживання потужність  $Ei$  (тут вона взята без втрат<sup>1</sup>) іде в другий трансформатор, який виконує обернене перетворення (в ідеальному випадку):  $Ei = el$ , і в такому вигляді потужність споживається двигунами та іншими споживачами електричної енергії.

Таке завдання трансформації струму для зменшення втрат при передачі (в дійсності в ідеальні рівняння треба внести поправки на втрати).

Один із перших трансформаторів був винайдений препаратом Московського університету І. Ф. Усагінім в 90-х роках минулого століття.

131. Трансформатор змінного струму. Рисунок 166 зображає трансформатор змінного струму, а рисунок 167 дає схему його будови і схему трансформації струму.

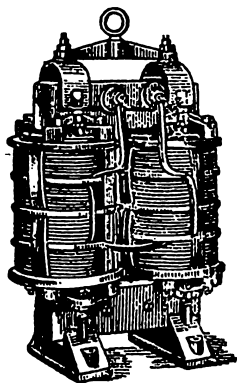


Рис. 166. Зовнішній вигляд трансформатора.

Технічний трансформатор являє собою раму прямокутного перерізу, складену з окремих залізних листів.

На одну сторону прямокутника навівається котушка  $a_1$  з невеликим числом витків ( $w_1$ ) товстого дроту, а на другу — котушка  $a_2$  з великою кількістю витків ( $w_2$ ) тонкого дроту.

На електростанції затискачі альтернатора  $A$  сполучаються з котушкою  $a_1$

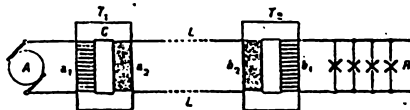


Рис. 167. Схема передачі електричної енергії.

підвищувального трансформатора  $T_1$ . Друга його котушка  $a_2$  сполучається проводами з котушкою  $b_2$  другого, знижувального трансформатора  $T_2$ , що знаходиться на місці споживання електричної енергії, хоч би й за сотні кілометрів від станції.

Котушка  $b_1$  другого трансформатора сполучена проводами з розподільною дошкою, що розподіляє енергію по споживачам, наприклад, по заводських моторах або освітлювальній сітці.

<sup>1</sup> Втрата напруги в сполучних проводах допускається до 15%.

При кожній зміні струму, який надходить у котушку  $a_1$  з генератора, залізна рама  $T_1$  намагнічується то в одному, то в протилежному напрямі. Магнітне поле, змінюючись, наводить струм відповідного напрямку у вторинній котушці  $a_2$ . В цій котушці виникає також змінний струм, число змін якого дорівнює числу змін первинного струму. Якщо первинний змінний струм має, як звичайно буває, 100 змін на секунду, тобто 50 періодів на секунду, то стільки ж періодів буде і у вторинному. ЕРС індукції прямо пропорціональна числу витків дроту в індуктованій котушці  $a_2$ .  $E$  (ЕРС у котушці  $a_2$ ) так відноситься до  $e$  (ЕРС у котушці  $a_1$ ), як число витків  $w_2$  котушки  $a_2$  — до числа витків  $w_1$  котушки  $a_1$ .

Тому відношення:

$$\frac{E}{e} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{\text{число витків у вторинній котушці}}{\text{число витків у первинній котушці}}$$

називається коефіцієнтом трансформації<sup>1</sup>.

На електростанції встановлюється трансформатор, що підвищує напругу.

По котушках  $a_2$  і  $b_2$  обох трансформаторів і по сполучних проводах проходить також змінний струм такого ж періода, як і в альтернаторі. Ці змінні струми, що проходять по котушці  $b_2$ , збуджують в залізі другого трансформатора змінне магнітне поле, яке також наводить змінні індукційні струми в котушці  $b_1$  другого трансформатора. Напруга в  $b_1$  буде в стільки разів менша, ніж у  $b_2$ , у скільки число витків котушки  $b_1$  менше числа витків котушки  $b_2$ .

При майже однаковій потужності в обох котушках величина струму в  $b_1$  буде в стільки разів більша, ніж у  $b_2$ , в скільки разів ЕРС у  $b_1$  менша ЕРС у  $b_2$ . Трансформатор на місці споживання  $e$ , отже, знижуючим напругу. Таке зниження необхідне тому, що електричне освітлення встановлюється здебільшого з напругою 120 — 220 вольтів.

Якщо, наприклад, в трансформаторі  $T_1$  коефіцієнт трансформації дорівнюватиме 200, то ЕРС в  $a_2$  буде в 200 раз більша, ніж в  $a_1$ , величина ж струму  $a_2$  буде в 200 раз менша величини струму в  $a_1$  (з рівності потужностей  $eI = Ei$ ). Із зменшенням же величини струму в 200 раз втрачає на Джоулеве тепло в тому ж провіднику зменшиться в  $200^2 = 40\,000$  раз.

В дійсності (у відміну від наведених вище розрахунків) і в трансформаторі відбувається деяка втрата енергії в наслідок нагрівання. Але завдяки відсутності обертових частин у трансформаторі, отже, завдяки відсутності тертя, загальні втрати дуже малі, і коефіцієнт корисної дії трансформатора досягає 98%. Через те що в трансформаторі утворюються величезні напруги, то для кращої ізоляції його вміщують в металічний кожух, за-

<sup>1</sup> У деяких підручниках коефіцієнтом трансформації називають відношення  $\frac{w_2}{w_1}$ .

повнений маслом, яке також відводить теплоту, що виділяється в обмотках трансформатора, тобто служить засобом охолодження трансформатора.

**132. Електрифікація.** Електрифікацією з фізичної точки зору називається перетворення різних форм енергії на місці їх добування в електричну енергію, передача її на місце споживання і перетворення там електричної енергії знову в ту форму, якої потребує споживач.

Альтернатор, трансформатор і мотор — три винаходи, які в своїй сукупності розв'язують це завдання.

До запровадження в промисловість електромотора джерело механічної енергії — паровий або тепловий двигун — природно ставилося як можна ближче до фабрики, бо стара трансмісія валами, щітками і безконечними пасами не допускала скільки-небудь далекої передачі. Тому в промислові місцевості треба було підвозити паливо, потрібне для живлення двигунів.

Розвиток промисловості при відсутності централізованого електропостачання вимагає збільшеного підвозу палива. Приставка палива на заводі дуже завантажує транспорт і є для них мало економічною справою. Але електрична енергія припускає дуже простий і, при застосуванні трансформації, вигідний спосіб передачі енергії. Природно виникає думка: не енергію підвозити в формі палива до місця силової установки, до машинного відділу фабрики, а силову установку перенести на місце запасів енергії, там перетворити ці запаси в електричну енергію, а цю останню спрямувати проводами на місце споживання.

Як дешеві запаси енергії використовуються місцеві види палива, які через свою малу калорійність були б невідгідні при далеких перевозах. Такими є: торф, буре вугілля, горючі сланці, вугільний пил, місцеві відходи фабрично-заводського виробництва.

Найдешевшою енергією є енергія падаючої води. Тому найграндіозніші електростанції ми бачимо на берегах водопадів: по обох берегах Ніагари в Америці, по ріці Замбезі в Африці, в гірських країнах — Швейцарії, Швеції, Норвегії.

На Україні закінчена і працює установка на Дніпрі — Дніпровська станція.

Потужність падаючої води використовується з допомогою гідростанції. На гідростанцію по трубі надходить вода, що падає з деякої висоти. Ця вода йде у водяну турбіну і віддає їй більшу частину своєї енергії, приводячи турбіну у швидке обертання. На вал турбіни насаджена обертова частина генератора, який перетворює механічну енергію турбіни в електричну енергію з тим більшим коефіцієнтом корисної дії, чим на більшу потужність він розрахований.

Електрична енергія йде в трансформатор і виходить з нього з малою втратою у вигляді струму високої напруги. В такому вигляді енергія передається на далекі віддалі (рис. 168) в сотні кілометрів; потім надходить у знижувальний трансформатор і там розподіляється по місцях споживання.

З усіх збудованих гідростанцій найбільшою є Дніпровська. Вона розрахована на потужність 600 000 *квт.*

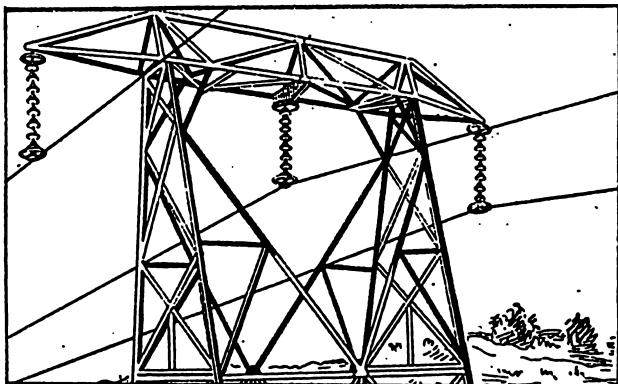


Рис. 168 Шогли для перекачі струму високої напруги.

**133. Дніпровська гідростанція.** Дніпровська станція являє собою капітальні споруди на ріці Дніпрі, що мають на меті, з одного боку, використати енергію порожиистої частини Дніпра між містами Дніпропетровськом і Запоріжжям, а з другого — зробити Дніпро в цій частині судноплавним. Цей проєкт почав здійснюватися з 1927 р., і станція почала працювати в 1933 р.

Водозливна частина греблі займає всю ширину русла ріки протяжністю в 760,5 м і розбита биками на 47 прольотів; висота падання води 37 м.

Витрата води 20 400 м<sup>3</sup>/сек.

На правому березі до греблі (рис. 169) приймає силова станція.

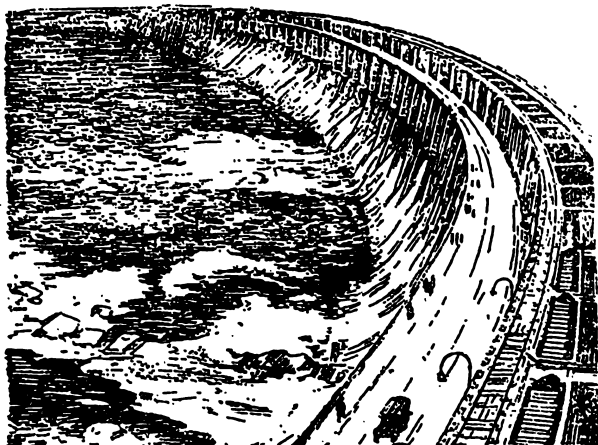


Рис. 169. Вигляд Дніпровської греблі.

Потужність станції визначено  $\approx 600\,000$  *квт*.

Взимку в маловодні роки може бути забезпечено тільки до  $184\,000$  *квт*; недостаюча потужність має поповнюватись паровою установкою.

На станції встановлено 9 турбогенераторів по  $66\,000$  *квт* кожний. Кожний турбогенератор складається з вертикальної турбіни Френсіса, безпосередньо сполученої з трифазним генератором. Кожний генератор дає напругу в  $13\,800$  V. Для передачі цей струм трансформується в струм з напругою в  $165\,000$  V, а в разі електричного зв'язку з Донбасом і до  $220\,000$  V. Крім 9 великих турбін, поставлено дві малі з потужністю по  $\approx 2500$  *квт* для обслуговування місцевих потреб. Загальна довжина станції —  $242$  м.

### Вправа 17.

1. Якщо передавати електричну потужність в  $6000$  *вт* при напрузі в  $110$  V і при напрузі в  $220$  V, то яке повинно бути відношення між площами перерізів проводів при однаковому питомому опорі?

2. В освітлювальну сітку змінного струму з напругою в  $120$  V вмикається трансформатор, що знижує напругу до  $8$  V. Знайти відношення між числами витків обох обмоток його.

3. Чому осердя трансформатора робиться з м'якого заліза?

4. Чому осердя трансформатора не робиться з суцільного куска заліза?

5. Яку вигоду дає замкнена форма трансформатора?

6. Трансформатор, ввімкнений в лінію змінного струму з напругою в  $35\,000$  V, дає між затискачами вторинної обмотки напругу в  $6600$  V. Знайти коефіцієнт трансформації.

7. Визначити число витків у вторинній обмотці підвищувального трансформатора, якщо в первинній обмотці  $120$  витків, а коефіцієнт трансформації дорівнює  $16$ .

8. У первинній обмотці підвищувального трансформатора  $80$  витків, у вторинній —  $1280$  витків. Яку напругу на затискачах вторинної обмотки можна мати, якщо ввімкнути первинну обмотку під напругою в  $115$  V?

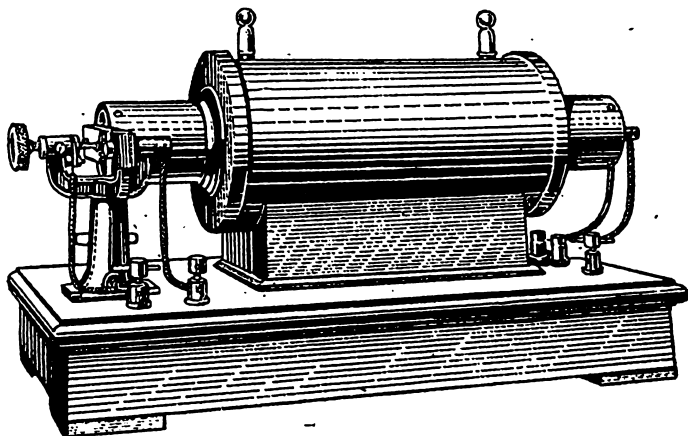


Рис. 170а. Котушка Румкорфа.



134. Індукційна котушка Румкорфа. Іншим видом трансформаторів, що підвищують напругу, є подана на рисунку 170а котушка, сконструйована Румкорфом (1851 р.) і названа його ім'ям.

Крім свого першого призначення — трансформувати змінний струм з підвищенням напруги — індукційна котушка служить також для перетворення постійного струму в змінний струм високої напруги. Але постійний струм наводить індукційні струми тільки в моменти його замикання або розмикання; тому для трансформації постійного струму його треба перетворити в переривчастий. Перетворення постійного струму в переривчастий робиться за допомогою переривників різного роду, найпростішим з яких є молоточковий переривник.

Котушка Румкорфа (рис. 170б) складається з осердя  $NS$  — пучка прутків м'якого заліза; на осердя надівається котушка первинної обмотки  $A_1B_1$  з невеликого числа витків товстого дроту, яка має малий опір; на первинну котушку надівається ізольована від неї вторинна обмотка  $A_2B_2$  з дуже великого числа витків дуже тонкого дроту. Кінці вторинної обмотки виведені назовні.

На пружній пластинці перед осердям котушки укріплюється молоточок  $M$ , головка якого зроблена з м'якого заліза. Пружна пластинка притискає головку до гвинта  $D$ , укріпленого на підставці. Основа молоточка сполучена з одним кінцем первинної обмотки. Джерело струму  $E$  прилучається до другого кінця первинної обмотки і до основи гвинта.

При замиканні струму в первинній обмотці осердя намагнічується, притягує молоточок і роз'єднує його від гвинта. Притягання молоточка спричиняє розрив кола в місці початкового дотику молоточка до гвинта; струм припиняється, намагнічення осердя зникає, пружність ножки молоточка відриває його від осердя і знову притискає до гвинта. Стикання молоточка з гвинтом знову замикає струм, і повторюється увесь ряд описаних явищ. Отже, протягом секунди первинний струм стільки разів замикатиметься й розмикатиметься, скільки коливань на секунду може робити молоточок.

При кожному замиканні струму в первинній котушці у вторинній індуктується струм, протилежний первинному; при розмиканні — однаково направлений з первинним. Величина ЕРС індукції у вторинній котушці тим значніша, чим більше число

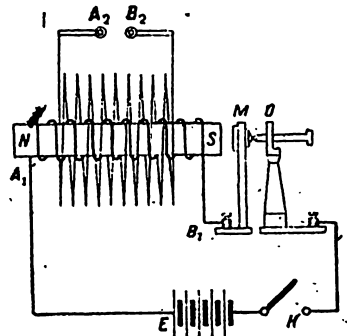


Рис. 170б. Схема будови котушки Румкорфа.

вітків вторинної котушки, величина первинного струму і чим більше число переривів первинного струму. Напругу в проміжку між кінцями вторинної обмотки при великих розмірах індуктора, при довжині дроту у вторинній обмотці в кілька десятків кілометрів і при вдосконалених переривниках (понад 1000 переривів на секунду) можна довести до кількох сотень тисяч вольтів. Котушки Румкорфа застосовуються в наукових дослідженнях і в техніці. З їх допомогою були зроблені найбільші наукові відкриття останнього півстоліття, що стосуються проходження електрики через гази, відкриття нового виду проміння, збудження електромагнітних коливань і т. д.

Індукційні котушки застосовуються в телефонній техніці. Струм, що живить мікрофон на передатній станції, спрямовують не безпосередньо на приймальну станцію, а в первинну обмотку індукційної котушки; вторинну ж обмотку її сполучають з телефоном-приймачем другої станції. При зміні величини струму у мікрофоні-передатнику в індукційній котушці збуджуються змінні струми, які, попадаючи в телефон-приймач другої станції, спричиняють у ньому коливання мембрани.

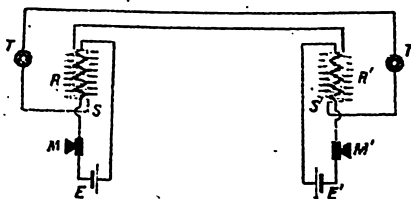


Рис. 171. Схема сполучень телефонних станцій.

Схема сполучення двох станцій (без викличного дзвоника) — дана на рисунку 171, де  $M$  і  $M'$  являють собою мікрофони двох станцій,  $T$  і  $T'$  — телефони їх,  $E$  і  $E'$  — батареї,  $S$  і  $S'$  — первинні котушки індукторів,  $R$  і  $R'$  — вторинні котушки індукторів. Спосіб сполучення і дії ясно видно з рисунка.

### ЗАПИТАННЯ.

1. У чому полягає трансформація струму?
2. Яка будова трансформатора змінного струму?
3. З якого матеріалу робиться осердя трансформатора? чому?
4. Як усуваються струми Фуко в осерді трансформатора?
5. Що називається трансформатором, що знижує напругу? підвищує?
6. Що називається коефіцієнтом трансформації? як він обчислюється?
7. Яка будова, призначення і застосування котушки Румкорфа?
8. В який струм перетворюється постійний струм, перш ніж утворюється змінний струм у котушці Румкорфа?
9. У чому полягає електрифікація країни?

## VII. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ.

135. Розряд лейденської банки. Думка про електричні коливання виникла із спостереження над розрядом лейденської банки. Як відомо, заряджена лейденська банка має на одній своїй обкладці позитивний електричний заряд, на другій — негативний. При сполученні обох обкладок провідником відбувається розряд банки, тобто переміщення різноіменних електрик до їх нейтралізації. Через те що переміщення електричних зарядів по провіднику можна розглядати як електричний струм, то була зроблена спроба (в 1827 р.) намагнітити розрядним струмом сталюю спицю. Провідник, що сполучає обкладки, згинався у формі спіралі, всередину якої вміщувалась намагнічувана спиця. Після розряду спиця справді ставала магнітом. Але якщо сполучний провідник мав дуже малий опір, то не можна було заздалегідь передбачити на підставі законів електромагнетизму, в якому напрямі буде намагнічена спиця: при одному її тому ж розподілі знаків електричних зарядів на обкладках банки на будь-якому кінці спиці утворювався то той, то другий полюс.

Останнє можна було пояснити тільки тим, що розряд конденсатора має коливний характер: електричні заряди переміщуються то в одному, то в другому напрямках.

Виникнення електричних коливань при розряді конденсатора через провідник з малим опором треба уявляти собі так. Нехай внутрішня обкладка заряджена позитивно, зовнішня — негативно. При наближенні кінця сполучного провода, що йде від зовнішньої обкладки до внутрішньої обкладки, виникає іскра; іскра складається з розжарених газів; останні є провідником; отже, іскра є немов би доброї провідності міст, перекинутий від металічного провідника до обкладки конденсатора. По цьому неперервному провіднику направляються під впливом взаємного притягання різноіменні заряди; точніше, електрони направляються з зовнішньої обкладки на внутрішню; виникає електричний струм, напрям якого береться від внутрішньої обкладки до зовнішньої. Навколо цього струму утворюється магнітне поле. В той момент, коли надмір електронів зовнішньої обкладки, перейшовши на внутрішню, поповнить недостачу на ній електронів і нейтралізує її позитивний заряд, напруженість електричного поля перетворюється в нуль. Електричний струм в цей час досягає найбільшого значення.

В цей момент електрична енергія зарядженого конденсатора цілком перейшла в енергію магнітного поля. Завдяки тому, що електрони будуть продовжувати свій рух в попередньому напрямі на тій обкладці, на якій спочатку був позитивний заряд, появлятиметься негативний заряд; між обкладками появлятиметься напруга; струм припиниться тоді, коли вся енергія магнітного поля цілком перейде в електричну енергію зарядженого конденсатора. Різниця між цим станом конденсатора і початковим полягає в тому, що обкладки помінялись знаками своїх зарядів.

Після цього явище повторюватиметься в тому ж порядку<sup>1</sup>. Час, протягом якого відбувається перехід електрики з однієї обкладки на другу і назад, називається періодом коливання.

Коливний характер розряду було підтверджено в 1862 р. безпосереднім дослідженням іскри в обертовому дзеркалі (вісь обертання паралельна довжині іскри) (рис. 172). Якби іскра являла собою поодинокий процес — звичайне сполучення двох електрик, тобто короточасний струм одного напрямку, то в обертовому дзеркалі вийшла б суцільна однорідна смуга (збільшена ширина іскри); проте, рисунок 172 показує, що свічення газу під час проходження іскри — переривчасте, воно чергується з темнотою. Дивлячись на рисунок, ми бачимо, що світлі язички перебігають з одного полюса на другий, тому можна зробити висновок, що іскровий розряд не є миттєвий електричний струм одного напрямку, як це здавалось з першого погляду, а, навпаки, він є процес коливний. Який не є короткий відрізок часу, протягом якого відбувається іскровий розряд, все ж його можна розбити на ще менші відрізки — коливання струму то в один бік, то в другий.

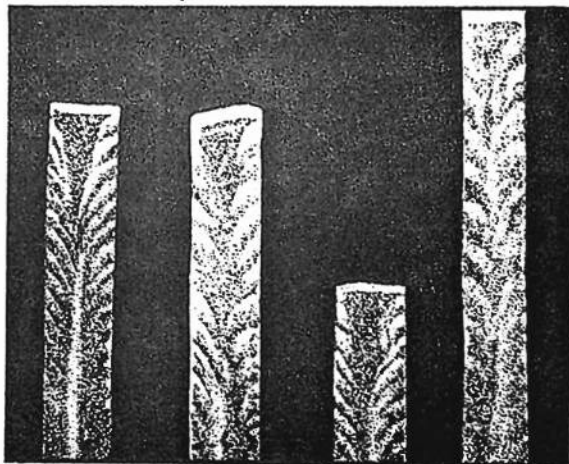


Рис. 172. Зображення іскер в обертовому дзеркалі.

Вимірявши швидкість обертання дзеркала і підрахувавши кількість світлих язичків за час існування однієї іскри, можна дістати частоту коливань струму при іскровому розряді. Обчислення показують, що іскровий розряд лейденської банки є змінний струм, який робить мільйони коливань на секунду.

Такий струм є струмом високої частоти.

<sup>1</sup> При розгляді розряду конденсатора ми знехтували опором сполучного провідника.

• 136. Коливний контур і період коливання. Замкнене коло, що складається з конденсатора і котушки самоіндукції (рис. 173), називається коливним контуром.

Від чого залежить частота коливань у коливному контурі?

Поперше, вона залежить від того, з якою швидкістю заряджається і розряджається конденсатор, тобто залежить від ємності конденсатора.

Друга причина полягає в самоіндукції провідника. В наслідок самоіндукції струм не відразу досягає свого найбільшого значення, а наростає поступово. Час цього наростання тим більший, чим більша самоіндукція провідника.

Таким чином, період електричного коливання збільшується разом із збільшенням ємності і самоіндукції коливного контура і зменшується із зменшенням їх.

Частота ж коливання обернено пропорційна періодові. Як у маятнику потенціальна енергія, яку він має в крайньому положенні, переходить при наблизненні до положення рівноваги

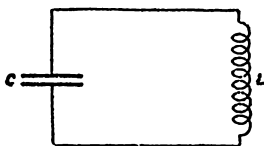


Рис. 173. Коливний контур:  $C$  — конденсатор;  $L$  — котушка самоіндукції.

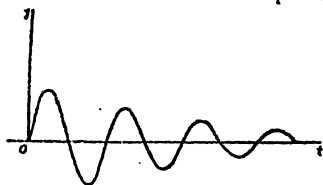


Рис. 174. Коливання струму при розряді конденсатора (затухаючі коливання).

в кінетичну, а при виведенні з положення рівноваги кінетична енергія переходить знову в потенціальну, так і при електричному коливанні електрична енергія конденсатора переходить в магнітну енергію струму, а остання — знову в електричну енергію. Як коливання маятника стають затухаючими при існуванні опору, так само затухають і електричні коливання, завдяки опоріві провідника, на нагрівання якого, за законом Джоуля, витрачається частина електричної енергії (рис. 174). При дуже великому опорі провідника, що сполучає обкладки, електричні коливання зовсім не виникають; так само й маятник, уміщений у в'язке масло, повільно без коливань переходить з крайнього положення у положення рівноваги.

137. Електромагнітні коливання. Надалі будемо уявляти собі кінці провідника, між якими проскакує іскра, розміщеними вертикально. Нехай у початковий момент верхній кінець заряджений позитивно, нижній — негативно. В просторі, що оточує два різномісних заряди, існує електричне поле (§ 11), силові лінії якого в даному випадку направлені вниз. Через половину періода коливання верхній кінець заряджається негативно, нижній — позитивно, і силові лінії дістають напрям угору. Двічі протягом періода міняються напрями напруженості електричного поля;

зміни напрямку можливі тільки при проходженні величини напруженості поля через нуль; двічі під час періода величина напруженості поля обертається в нуль; в проміжки між нульовими значеннями вона досягає максимальних значень. Якби зобразити графічно зміну напруженості електричного поля, відкладаючи по горизонтальній осі відрізки, що відповідають рівним частинам періода, а по вертикалям — величини, пропорціональні напруженості електричного поля для кожного моменту, то крива мала б вигляд синусоїди.

Але через те що зміна напруженості електричного поля спричиняється електричним струмом, то, як показано в попередньому параграфі, одночасно виникає і магнітне поле. Його напруженість також двічі під час періода змінює свій напрям, а, отже, і величину. Її зміни зобразяться такою ж синусоїдою. Але магнітні силові лінії розміщені у площині, перпендикулярній до лінії струму, отже, і до електричних силових ліній. При коливаннях у будь-якій точці напруженості електричного і магнітного полів взаємно перпендикулярні. Отже, електричне коливання супроводиться одночасним виникненням магнітного поля, що періодично змінюється, а це останнє, в свою чергу, зумовлює змінне електричне

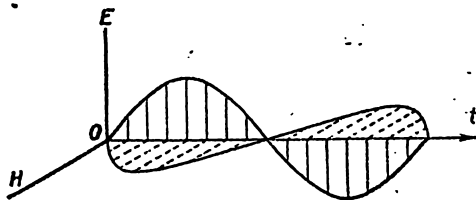


Рис. 175. Електромагнітна хвиля, що рухається вправо.

поле. Одночасне виникнення і періодична зміна зв'язаних між собою електричних і магнітних полів, напруженості яких взаємно перпендикулярні, називається електромагнітним коливанням.

138. Електромагнітні хвилі. Коли в провіднику замикається або розмикається струм, в навколишньому просторі виникає змінне (зростаюче або убуваюче) магнітне поле. Силові лінії цього поля можна простежити на деякій віддалі.

Із збільшенням чутливості приладів віддалі, на яких можна було б виявити силові лінії, збільшилися б; теоретично цю віддаль можна вважати безмежною.

Змінне магнітне поле у будь-якій точці простору спричиняє явище індукції в провіднику, який поміщається в цій точці, тобто переміщення вільних електронів у провіднику. Але відсутність провідника зумовлює тільки відсутність переміщення електрики; змінне електричне поле існуватиме і без провідника.

Отже, замикання і розмикання струму в провіднику спричиняє в навколишньому просторі переміщення електричного і магнітного полів (рис. 175).

Нехай замикання і розмикання струму, або переміщення електрики то в одному, то в другому напрямі відбуватимуться з такою частотою, як у коливному розряді, — мільйони раз на секунду; тоді, в той час як біля провідника силові лінії електричного і магнітного полів уже змінять свої напрями, ця зміна не встигне поширитися до більш віддалених частин простору, і в цих частинах простору існуватимуть ще силові лінії попереднього утворення. Це поступове поширення з скінченною швидкістю змін електричного і магнітного полів, спричинюваних коливним розрядом, можна наочно представити для електричних ліній у вигляді, зображеному на рисунку 176. З нього видно,

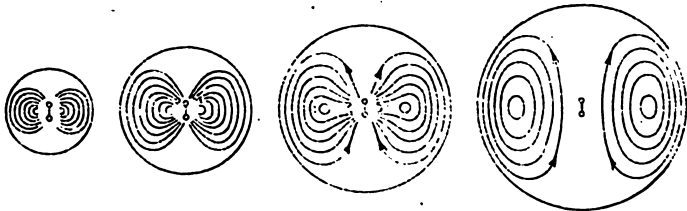


Рис. 176. Електричне поле вібратора протягом першої половини періода коливання.

що через половину періода електричні силові лінії перетворюються в замкнені криві (якими вони не можуть бути, поки вони зв'язані з зарядами на провідниках). Через половину періода виникають силові лінії протилежного напрямку (рис. 177). В сусідніх частинах нові і попередні силові лінії мають однаковий напрям.

Одночасно виникає і магнітне поле, силові лінії якого лежать у площині, перпендикулярній до площини рисунка. Період коливань магнітної і електричної сили в кожній точці простору і число коливань такі самі, як і в коливному розряді; але для кожної точки простору зміни електричних і магнітних полів запізнюються порівняно з точками, що лежать ближче від іскрового проміжка. Якщо провести через середину іскрового проміжка перпендикулярно до провідника пряму і відкласти на перпендикулярі в кожній точці прямої відрізки, пропорціональні значенням електричної сили в цій точці, то кінці цих перпендикулярів для одного й того ж моменту часу улягатимуть на синусоїді (рис. 175). Така крива зображатиме для кожного моменту хвилеподібний розподіл електричної сили в просторі. Така ж крива, тільки вміщена під кутом в  $90^\circ$  до першої, зобразить хвилеподібний розподіл магнітної сили в просторі. *Одночасне поширення електричної і магнітної хвиль називається електромагнітною хвилею.* Пряма, перпен-

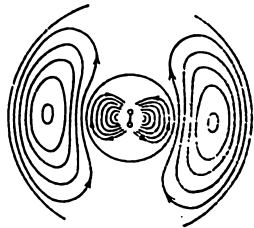


Рис. 177. Початок другої половини періода.

дикулярна до напрямів електричної і магнітної сили, дає напрям електромагнітної хвилі і називається променем. Електричні й магнітні коливання є поперечні коливання. Як обчислено, швидкість поширення електромагнітної хвилі в пустоті дорівнює 300 000 км/сек, тобто швидкості світла; при 1 000 000 коливань на секунду довжина хвилі

$$\lambda = \frac{c}{10^6 \text{ сек}^{-1}} = \frac{3 \cdot 10^8}{10^6} \text{ м} = 300 \text{ м}.$$

**139. Експериментальне дослідження електромагнітних хвиль.** Теорія електромагнітних коливань була розроблена знаменитим англійським фізиком Максвеллом в 1863 р. Тільки в 1888 р. німецький фізик Герц зумів експериментально підтвердити всі теоретичні висновки Максвелла.

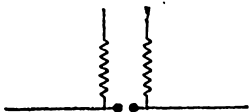


Рис. 178. Вібратор Герца.



Рис. 179. Резонатор.

Прилад, який дає коливання, називається вібратором. Герц сівши на прямолінійному вібраторі, що складається з двох стрижнів з кульками на кінцях (рис. 178). Різноміненні заряди підводилися до стрижня по дригках, що сполучають їх з кінцями вторинної обмотки котушки Румкорфа.

В дослідях Герца вібратор давав хвилі в 60 см довжини; отже, створював 500 000 000 коливань на секунду



Герц (1857 - 1894).

$$\left( \nu = \frac{3 \cdot 10^{10} \frac{\text{см}}{\text{сек}}}{60 \text{ с.м}} = 0,5 \cdot 10^9 \text{ сек}^{-1} \right).$$

Для виявлення коливань Герц використав явище резонансу.

Прилад, що виявляє електромагнітні коливання з допомогою резонансу, називається резонатором. Як резонатор можна взяти два прямих стрижні з кульками на кінцях (рис. 179). Для настроювання його на резонанс досить змінювати ємність, змінюючи його довжину; для цього служать надіти на стрижні мідні трубки С, С, більш-менш глибоко насовувані на стрижні.

Коли резонатор настроєно у резонанс з вібратором і поставлено паралельно йому, то між його кульками проскакує іскра в ті моменти, коли на місці його знаходження виникає максимум напруженості поля.



Іскру слабо видно, а тому, щоб виявити електричні коливання в резонаторі, кудьки резонатора сполучають з іншим приладом, що називається когерером (рис. 180). Він являє собою скляну трубочку, в яку з кінців вставлено два металічних стрижні, що не доходять один до одного; проміжок між ними наповнено мідними або срібними опилками. Когерер вмикається в коло місцевої батареї з електричним дзвоником. Завдяки повітряним проміжкам між опилками когерер чинить настільки великий опір постійному струмові батареї, що дзвоник не дзвонить. Але коли в резонаторі збуджуються електричні коливання і між окремими опилками проскакують іскри, що спаюють опилки, опір різко спадає, і дзвоник починає дзвонити. Досить легкого постукування по когереру, щоб привести його в попередній стан. (Це постукування може робитися автоматично — електромагнітним молоточком, увімкненим у те саме коло.) Отже, діяння дзвоника вказує на виникнення в резонаторі електричних коливань.

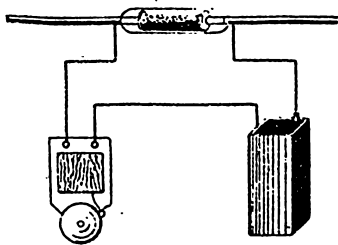


Рис. 180. Когерер.

З допомогою вібратора і резонатора, встановлених у фокусі металічного параболічного дзеркала (рис. 181), Герц спостерігав

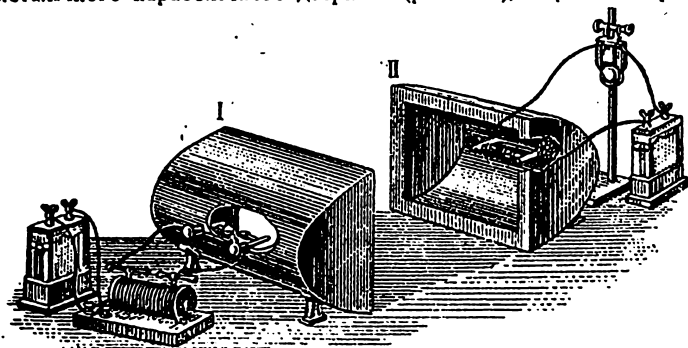


Рис. 181. Установа для дослідів Герца.

відбивання електромагнітних хвиль від металічного провідника (рис. 182) і заломлення їх в діелектрику, наприклад, у призмі з сірки або парафіну (рис. 183). Електромагнітні хвилі підлягають тим же законам відбиття і заломлення, як і світло.

Такими дослідями Герц відтворив з електромагнітними коливаннями і інші явища, схожі на світлові.

Пізніші вчені, і серед них видатний московський фізик П. Н. Лебедев, дістали ще коротші хвилі — до 3 мм довжини.

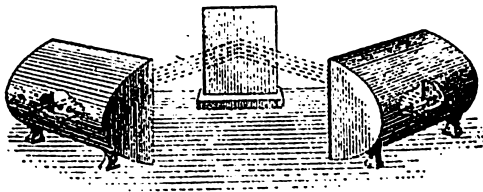


Рис. 182. Відбивання електромагнітних хвиль.

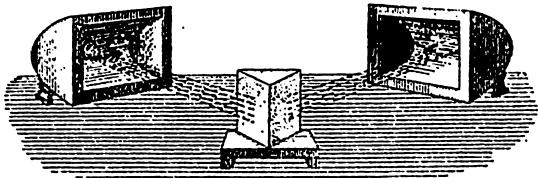


Рис. 183. Заломлення електромагнітних хвиль.

140. Радіопередача. В теорії Максвелла і в дослідах Герца були вже закладені всі основи для передачі і сприймання електромагнітних коливань на віддалі і без проводів. Через те що лінія поширення електромагнітної хвилі називається променем, а латинською мовою промінь називається радіусом, то передача електромагнітної енергії в просторі без проводів дістала назву радіопередачі.

Першим здійснив радіопередачу в 1895 р. петербурзький професор О. С. Попов (1859 — 1905), що зумів передати телеграфні знаки на 3 км з лишком.

Передачу на великі віддалі у той же час розробляв італійський інженер Марконі.

Вся робота Марконі і наступних винахідників була спрямована в бік технічних удосконалень основних експериментів.

Технічні дослідження пішли на створення потужних збудників коливань (генераторів), на будівництво відповідних коливних контурів і винайдення пристроїв для найпотужнішого випромінювання в простір.

141. Електронна лампа. В § 108 було описано виникнення електронного потоку від розжареного катода до анода в електронній трубці.

Для посилення її діяннн між анодом  $A$  і катодом  $K$  впаюється металічна сітка  $G$  (рис. 184). Якщо сітка не заряджена, електрони вільно проходять через неї, досягаючи анода  $A$ . Якщо сітка заряджена позитивною електрикою, її дія буде однакова з дією анода, і вона притягатиме електрони, що вилітають з катода. Якщо ж вона заряджена негативним зарядом, то вона відштовхуватиме електрони назад до катода.

Отже, коливання потенціала сітки створюють коливання анодного струму. При цьому коливання анодного струму можуть бути в дуже збільшеному вигляді порівняно з коливаннями на сітці. Тому триелектродна лампа може застосовуватися як посилювач слабких коливань струму в радіоприймачі.

Зміна заряду сітки досягається сполученням її з контуром, на якому відбувається електричне коливання.

Отже, при певних умовах лампа може діяти як випростувач і в той же час як підсилювач електричних коливань.

Якщо хочемо посилити коливання високої частоти і при тому однієї певної частоти, то треба паралельно котушці ввімкнути конденсатор  $C$  (рис. 184), дібравши ємність  $C$  і котушку  $L$  так, щоб контур  $LC$  резонував з тими коливаннями, які мають на увазі приймати. Резонуючі коливання контура викликають посилені коливання струму в лампі.

Окрема лампа може посилювати коливання в багато разів.

Електронна лампа застосовується також як генератор коливань. Якщо в коло анода лампи ввімкнуту котушку і підвести її до котушки того контура, який входить у коло сітки, то утворюється так званий зворотний зв'язок.

Уявмо собі, що з якоїсь причини, наприклад від замикання анодного кола, виникло перше коливання в анодному колі.

Внаслідок індукції коливання в котушці  $L_1$  анодного кола збуджує коливання в котушці  $L$  кола сітки. Коливання в колі сітки, яке б воно не було мале, впливає, за описаним вище правилом, на коливання в анодному колі, посилюючи його. Це посилене коливання в анодному колі знову ж таки через індукцію котушки  $L_1$  збуджує також сильніше коливання, ніж на початку, в котушці  $L$  і в усьому колі сітки, що веде за собою дальше збільшення амплітуд коливань в анодному колі.

Розмір збільшення амплітуд в анодному колі залежить від відповідного добору розміру котушок, або, інакше кажучи, від настроєння на резонанс обох контурів.

В цьому разі електронна лампа перетворюється в генератор незатухаючих коливань.

Якщо прилучити до контура анодного кола заземлену антену, тобто зробити контур відкритим, то він почне випромінювати електромагнітні хвилі в простір.

**142. Будова антени.** На початку робилась передача на довгих хвилях. Через те що довжина вібратора повинна дорівнювати половині довжини хвилі, то треба було б будувати вібратори завдовжки в кілька кілометрів, тобто технічно нездійсненого розміру (рис. 185, а). Досліди показали, що для тієї ж потреби досить робити прямими тільки зовнішні кінці вібратора,

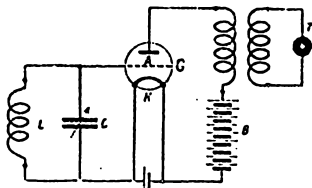


Рис. 181. Схема ввімкнення катодної лампи.

а середину змотувати в котушки (рис. 185, б); цим розміра вібратора значно скорочувались. Даліше зменшення розміру було викликане тим же експериментальними даними, що нижню половину вібратора можна було сполучити безпосередньо з землею (рис. 185, в). Нарешті, виявилось, що вертикальний вібратор можна замінити проводом або сіткою проводів, протягнутих горизонтально на відповідній висоті.

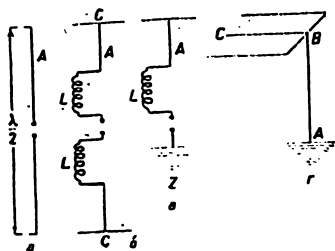


Рис. 185. а, б, в, г — зміна форми антени.

Сукупність проводів, підвішених на висоті і призначених як для випромінювання, так і для уловлювання електромагнітних хвиль, називається антеною. Антени бувають різних видів; один із видів зображений на рисунку 185, г, загальний вигляд установки — на рисунку 186.

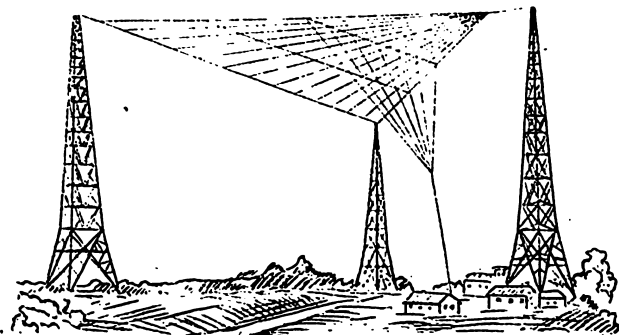


Рис. 186. Загальний вигляд установки антени.

**143. Радіотелеграф.** Схеми сучасних радіотелеграфних установок дуже складні. Щоб дати хоч деяке уявлення про радіотелеграф, подаємо найпростішу, хоч і неживану тепер, схему іскрового радіотелеграфа (рис. 187). На передатній станції є коло, що складається з ємності  $C$  — конденсатора, самоіндукції  $L$  — котушки і іскрового проміжку  $F$ ; таке коло, як сказано вище, називається коливним контуром. По двох проводах підводиться до цього контура змінна напруга або від котушки Румкорфа, або від машини змінного струму (альтернатора) дуже великої частоти. Щоразу, як у проміжку  $F$  проскакує іскра, в цьому контурі виникають електричні коливання; але при закритті формі першого контура він слабо випромінює в простір; майже

вся енергія змінних струмів іде на його нагрівання; тому з ним сполучений відкритий вібратор — антена. Сполучення може бути безпосереднім, коли, як на рисунку, кінець антени сполучений ковзним контактом з котушкою першого контура; або може бути зв'язок індукційний, коли поруч з першою котушкою ставиться друга, ввімкнена в антену; коливання в першій котушці через індукцію збуджують такі ж коливання в другій, а ці останні випромінюються антеною в простір. В обох випадках нижня частина антени повинна бути сполучена з землею.

На передатній станції в коло індукційної котушки, або альтернатора, ввімкнено звичайний телеграфний ключ, за допомогою якого струм індуктора замикається або на короткий час (відповідає точці телеграфної азбуки), або на довгий час (відповідає рисці).

На приймальній станції (рис. 187) антена, котушка й конденсатор розміщені так само, як і на передатній, тільки в іскровий проміжок замкненого контура вміщено когерер, увімкнений у коло телеграфного апарата. При збудженні коливань на приймальній станції когерер робиться провідником і замикає коло телеграфного апарата, який залежно від тривалості натиску ключа дає сполучення точок і рисок (щоразу молоточок автоматично робить постукування по когереру).

Для настроєння на резонанс ємність і самоіндукція, що впливають на величину періода коливання, повинні бути змінними.

**144. Прийом телеграфування на слух.** Приймання радіотелеграм через когерер і електромагнітний телеграф, який застосовувався на початку розвитку радіотехніки, тепер вийшло з ужитку через свою малу чутливість і замінене прийманням на слух через телефон.

Телефон може дуже добре виявляти змінні струми низької частоти. Телефон, ввімкнений в освітлювальну сітку послідовно з величезним опором (для зменшення величини струму, що проходить через нього), дає звук, що відповідає 50 коливанням на секунду. Під час одного коливання струму мембрана телефона наблизиться і віддаляться від електромагніта його, тобто зробить одне коливання.

Але мембрана телефона занадто інертна, щоб робити коливання в сотні тисяч раз на секунду, які відповідають елек-

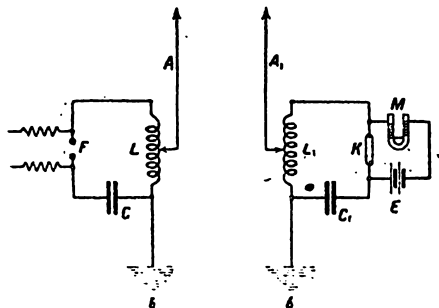


Рис. 187. Радіотелеграфна установка.

тричним коливанням. Ввімкнений за схемою рисунка телефон замість когерера телеграфного апарата не дає ніякого звуку.

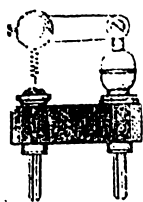


Рис. 188. Кристалічний детектор

Одержання звуку в телефоні від електромагнітних коливань радіопередачі можливе тільки при одночасному ввімкненні в коло радіоприймача випростувача струму.

Одним з найпростіших своєю будовою є кристалічний детектор - випростувач.

**145. Кристалічний детектор.** Кристалічний детектор (рис. 188) складається з кристала свинцевого блиску (PbS) або піриту (FeS<sub>2</sub>), або карборунду (SiC), сполучених з одним кінцем резонуючого контура. Коли до кристала доторкаються дротинкою, яка є другим кінцем того ж кола, то електричний струм краще проходить в одному напрямі і гірше — в другому. Отже, кристалічний

детектор є випростувачем струму: через нього проходить струм постійного напрямку, але пульсуючий. При величезній кількості пульсацій на секунду мембрана телефона не поспіває за зміною величини струму і займає якесь певне середнє положення, що відповідає певній середній величині струму.

Але якщо з допомогою ключа на передатній станції робити вмикання й вимикання індуктора або яким-небудь способом змінювати величину струму в ньому, тоді і середня величина випростаного через детектор струму на приймальній станції, відзначувана телефоном, мінятиметься, через що мембрана мінятиме своє положення і спричинятиме звук; цей звук і можна чути в телефон, який тепер поміщається на приймальній станції на місці телеграфного апарата. Отже, сигнали приймаються на слух.

Дію детектора можна уявити собі так. Прибуваюче затухаюче коливання графічно зображається кривими рисунка 189. Детектор, що пропускає коливання тільки в одному напрямі, перетворює їх у пульсуючі в одному напрямі, вони зобразяться графіком рисунка 190. Ці рисунки показують, що максимуми й мінімуми величини

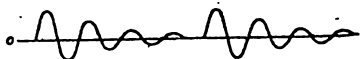


Рис. 189. Графік затухаючих коливань.



Рис. 190. Графік пульсуючих коливань.

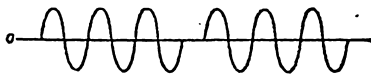


Рис. 191. Синусоїди незатухаючих коливань.

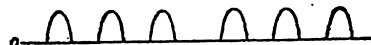


Рис. 192. Вплив детектора на незатухаючі коливання



Рис. 193. Обвідна кривих, що зображають випрямлені незатухаючі коливання.

струму повторюватимуться через відрізки часу, що охоплюють велику кількість електромагнітних коливань. Ці максимуми і мінімуми, з свого боку, складуть коливання, період яких буде в багато разів більший, ніж період електромагнітних коливань. Ці останні коливання вже можуть бути сприйняті й передані телефоном, бо частота їх знижена до меж частоти звукових коливань.

Рисунки 191, 192, 193 показують вплив детектора на незатухаючі коливання. При замиканні струму чути в телефоні ляск від притягування мембрани до електромагніта; при розмиканні — ляск відлітання. Два ляски, відокремлені коротким проміжком,

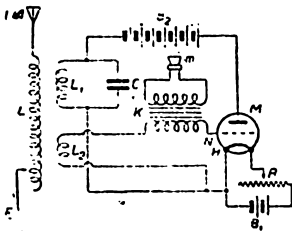


Рис. 194. Схема вмикання мікрофона.

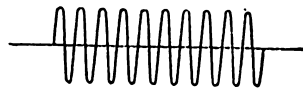


Рис. 195. Коливання без ввімкнення мікрофона.

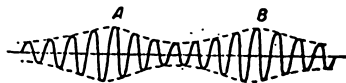


Рис. 196. Коливання при модуляції.

відповідають точці, два телефонних ляски з довгим проміжком між ними відповідають тире телефонної азбуки.

Отже, сукупність детектора й телефона перетворює електричну енергію струму високої частоти в енергію звукову.

Радіотелеграми сприймаються або на слух радіотелеграфістами — «слухачами» — або записуються автоматично.

146. Радіотелефонія. Якщо в передавальник ввімкнути відповідним чином мікрофон, то на приймальній станції можна чути звуки, що відповідають тим, які вимовляються перед мікрофоном.

Рисунок 194 дає схему вмикання мікрофона на передатній станції.

При недіянні мікрофона приймальна станція дістає ряд незатухаючих коливань з постійною амплітудою (рис. 195). При вимовленні перед мікрофоном якогонебудь звуку, наприклад, з 512 коливаннями на секунду, мембрана мікрофона 512 раз притиснеться до вугільного порошку і стільки ж разів відсунеться від нього. Від цього 512 раз на секунду станеться зменшення і збільшення опору мікрофона, і, отже, стільки ж разів струм пройде через максимум і мінімум. Отже, коливання від мікрофона накладуться на коливання від генератора і створять в антені коливання складного характеру, крива яких зображена на рисунку 196.

Накладання коливань низької частоти на коливання високої частоти називається модуляцією. На приймальній станції детектор перетворить повні коливання в пульсації, зрівнявши одну половину коливань (рис. 197), а телефон сприйме коливання виду, зображеного на рисунку 198. Число коливань телефонної пластинки відповідає числу коливань мікрофонної, тому телефон передає ті звуки, які відано було перед мікрофоном.

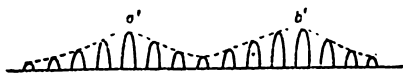


Рис. 197. Діяння детектора при модуляції.



Рис. 198. Коливання, сприймані телефоном.

147. Телемеханіка і телебачення. Закінчуючи короткий огляд радіотелеграфії і радіотелефонії, треба згадати ще про два великих найновіших винаходи: передача на віддалі зображень і керування на віддалі суднами, літальними апаратами та іншими подібними приладами. Ті й другі винаходи

служать як потребам культурного зв'язку людства, так і потребам оборони країни. В останньому відношенні особливо важливе значення має керування приладами на віддалі, або телемеханіка.

Уявимо собі, що на літаку кожний важіль керування приводиться в рух електромагнітом, ввімкненим у колівний контур, що настроєний в резонанс з коливаннями певного періода. Такі літаки, на яких є засоби оборони і нападу — кулемети, бомби, — можуть літати без людей. Для керування ними з якогонебудь військового центра посилаються електромагнітні коливання певного періода для приведення в дію відповідного важеля. Попадаючи на колівний контур, зв'язаний з певним важелем, електромагнітні хвилі збуджують у його контурі по резонансу коливання і приводять важіль у рух. Цим самим робиться переміщення літака в бажаному напрямі або починається стрільба з кулемета, і скидаються бомби.

Зображення передається так само, як і звуки. На передатній станції в сітку антени вставляється замість мікрофона фотослемемент — прилад, в якому величина струму змінюється залежно від освітлення. Перед фотоелементом обертається на барабані передавана картина. Різний ступінь освітлення фотоелемента частинами картини різної яскравості спричиняє коливання величини струму в колі, в результаті чого виникає модуляція коливання високої частоти. Ці модуляції викликають у приймачі зміну сили світла джерела світла. Світлові коливання сприймаються фотографічно або відтворюють картину на обертовому барабані.

Крім передачі зображень, записів, малюнків і т. ін., що має велике значення в господарському житті і в обороні країни, досить високо розроблена техніка передачі зображення рухомих предметів.



# ОПТИКА.

---

## ВСТУП.

Відомим нам з життєвого досвіду видом променистої енергії є світло. Що світло є вид енергії, ми легко можемо переконатися з того, що при освітленні тіл вони нагріваються, тобто виникає теплова форма енергії. Але, будучи різновидністю енергії, промениста енергія значно відрізняється від розглянутих вище видів енергії.

Промениста енергія, наприклад сонячне світло, передається на Землю через простір, в якому є дуже малі сліди речовини. В наших лабораторних експериментах ми можемо пропускати світло через внутрішні порожнини трубок, в яких досягнуто найвищого ступеня розрідження газів, і передача променистої енергії від відсутності речовини не тільки не погіршується, а, навпаки, поліпшується.

Всяке явище природи є зміна, що відбувається в матерії; і промениста енергія є рід руху особливої матерії; цей вид матерії, який є передавальником світла і носієм електричного і магнітного полів і поля тяжіння, має назву ефіру.

На вивченні світлових явищ заснована техніка штучного освітлення жител; робочих будівель і громадських приміщень, техніка фарбування і техніка управління ходом світлових променів, саме техніка оптичних приладів, яка набуває такого величезного значення в справі оборони країни. Світлові способи вимірювання температури розтоплюваних тіл застосовуються в металургії. Промениста енергія використовується також у рентгено-техніці, де застосовуються спеціальні промені, так звані рентгенівські; вони використовуються в медицині для дослідження стану внутрішніх органів живого організму і в металургії для дослідження будови металічних виробів.

Агротехніка зв'язана з використанням променистої енергії, що посилається на Землю Сонцем.

Завдяки наявності у людини органу зору — ока, світловий промінь став знаряддям пізнання світу для людини. Побудувавши мікроскопи, телескопи і прилади, що передають світлові сигнали, людина надзвичайно розширила область свого знання: від розпізнавання частин атома, від розташування атомів у молекулі, від будови клітини — цієї основи життя, — до вивчення складу, руху, величини мас і процесів виникнення і зникнення світлів, які знаходяться на безмежно великих віддальх від нашої Землі.

## I. ПОШИРЕННЯ СВІТЛА.

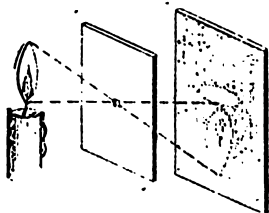


Рис. 199. Проходження променів через малий отвір.

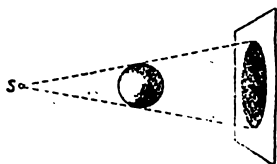


Рис. 200. Утворення тіні.

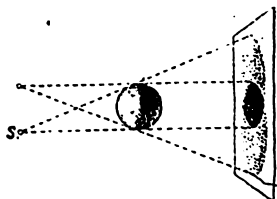


Рис. 201. Утворення півтіні.

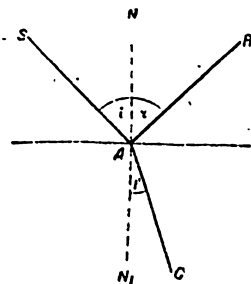


Рис. 202. Промені — падаючий, відбитий і заломлений.

148. Поширення світла в однорідному середовищі. Спроби з одержанням зображення предмета при проходженні світла від нього через малий отвір і спроби з утворенням тіней та півтіней від непрозорих предметів (рис. 199, 200, 201), розглянуті в початковому курсі фізики, привели до висновку про *прямолінійне поширення світла від світної точки в однорідному середовищі*.

149. Світлові явища на межі двох середовищ. Коли світловий промінь падає на межу двох середовищ, то енергія, яку несе промінь, поділяється на дві частини (рис. 202): частина енергії лишається в тому ж середовищі, але змінюється напрям її поширення; вона дає початок відбитому променю; друга частина переходить в друге середовище, при чому також змінюється напрям її поширення, і вона дає початок заломленому променю.

Явище, при якому змінюється напрям променя на межі двох середовищ, коли промінь лишається в тому ж середовищі, називається *відбиванням*.

Явище, при якому змінюється напрям променя на межі при переході його в друге середовище, називається *заломленням*. Промінь *AB*, що відбився від межі, називається променем *відбитим*; промінь *AC*, що перейшов у друге середовище, називається променем *заломленим*.

*Кут між перпендикуляром до межі двох середовищ у точці падання променя і променем падаючим називається кутом падання; кут між перпендикуляром і променем відбитим називається кутом відбивання; кут між перпендикуляром і променем заломленим називається кутом заломлення.*

Гладко відшліфована поверхня, що відбиває проміння, називається *дзер-*

калом. Дзеркалом є відполірована поверхня металів, а також поверхня чистої ртуті і т. ін.

Із збільшенням кута падання зростає кількість відбитого світла і зменшується кількість заломленого; при зменшенні кута падання — навпаки. Від спокійної поверхні ставу чіткіше відбиваються до спостерігача промені від далеких предметів, ніж від близьких; навпаки, дно<sup>1</sup> краще можна розглянути на близькій віддалі від човна, ніж на далекій.

Закони відбивання відомі з першого концентру фізики. Вони повинні дати відповідь на питання, як знайти відбитий промінь за заданим падаючим. Перший закон указує, в якій площині лежить відбитий промінь; другий — під яким кутом у цій площині він направлений. Закони відбивання виведено експериментально<sup>2</sup>.

1. Промінь відбитий лежить в одній площині з променем падаючим і перпендикуляром до межі в точці падання.
2. Кут відбивання дорівнює куту падання.

Якщо позначити кут падання через  $i$ , кут відбивання через  $r$ , то  $\angle i = \angle r$ .

Висновок з обох законів — оборотність променя, тобто якщо направити падаючий промінь в напрямі відбитого, то він відіб'ється в напрямі початкового падаючого променя.

150. Зображення в плоскому дзеркалі. На підставі законів відбивання можна знайти зображення світлої точки або предмета в плоскому і кривому дзеркалах.

Щоб знайти зображення точки в плоскому дзеркалі (рис. 203), візьмемо з проміння, що від неї відходить, два промені: один — перпендикулярний до дзеркала, другий — похилій. Промінь  $SA$ , перпендикулярний до дзеркала  $MN$ , відіб'ється від нього у тому ж напрямі. Похилій промінь  $SB$  відіб'ється в напрямі  $BC$ . Якщо обидва відбиті промені попадуть в око, то вони здаватимуться йому такими, що виходять з точки перетину їх уявних продовжень, тобто з точки  $S_1$ . З рівності трикутників  $SAB$  і  $S_1AB$  випливає, що  $S_1A = SA$ .

Який би похилій промінь (наприклад  $SB_1$ ) не було взято разом з перпендикулярним  $SA$ , можна довести таким же способом, що точка перетину уявних продовжень буде  $S_1$ . Отже,  $S_1$  є зображення точки  $S$  у плоскому дзеркалі. Це зображення називається уявним, бо в ньому немає перетину самих променів: промені так відбиваються, що здається, ніби вони виходять з цієї

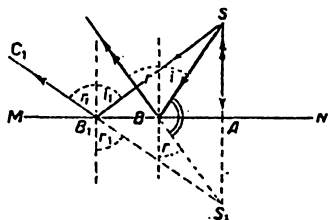


Рис. 203. Побудова зображення світлої точки в плоскому дзеркалі.

<sup>1</sup> Дно розглядається з допомогою світлових променів, що перейшли з повітря у воду і відбилися від дна.

<sup>2</sup> Закони відбивання світла були відомі ще Евклідові (305 р. до н. е.).

точки. Ця точка  $S_1$  симетрична точці  $S$ ; симетричними точками щодо площини називаються дві точки, що лежать на одному перпендикулярі до площини по обидві сторони її на рівних відстанях.

Отже, зображення світної точки у плоскому дзеркалі уявне і симетричне світній точці.

Щоб побудувати зображення предмета в плоскому дзеркалі, треба для кожної його точки знайти симетричну точку. Рисунок 204 дає побудову зображення предмета в плоскому дзеркалі.

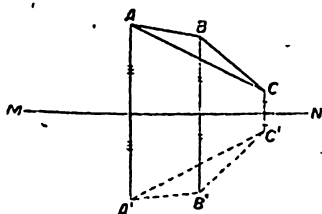


Рис. 204. Побудова зображення предмета в плоскому дзеркалі.

Зображення предмета в плоскому дзеркалі уявне і симетричне йому.

### 151. Лабораторна робота 6. Дослідження законів заломлення світла.

Прилади: 1) прилад для спроб із світлом (рис. 205); 2) скляний півциліндр; 3) скляна порожниста посудина в формі півциліндра; 4) вода і якебудь інші прозорі рідини;

5) сильне джерело світла, одне для всіх працюючих.

Хід роботи. 1. Поставте суцільний скляний півциліндр на фанерний<sup>1</sup> круг так, щоб діаметр і центр півциліндра збіглися з діаметром і центром круга.

2. Направте щільну прилада на сонячне або штучне джерело світла і переміщайте прилад доти, поки вузький пучок світла, що пройшов через щільну, не попаде в середину плоскої грані півциліндра; встановіть круг так, щоб обидва промені — падаючий і заломлений — освітили фанерний круг і дали на ньому світний слід.

3. Виміряйте за накладеним транспортиром кут падання  $i$ , кут заломлення  $i'$ ; обчисліть за таблицями синуси їх, знайдіть відношення  $\frac{\sin i}{\sin i'}$ .

4. Переміщаючи пластинку з щільною, змініть ще 5—6 раз кут падання і для кожного з них зробіть зазначені вище вимірювання і обчислення. Направте промінь перпендикулярно до площини півциліндра.

5. Замініть суцільне скло порожнистою посудиною; заповніть її водою або іншою рідиною і зробіть ті самі вимірювання.

6. Для кожної речовини запишіть одержувані числа в таблицю:

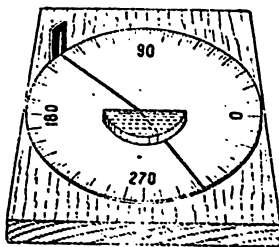


Рис. 205. Прилад для вивчення законів заломлення світла.

<sup>1</sup> Фанерний круг з наклеєним на нього паперовим кругом, поділеним на градуси і їх половини, з проведеними на ньому двома взаємно перпендикулярними діаметрами. По колу може пересуватися жерстяна пластинка з вертикальною щільною. В центрі круга знаходяться стекла (прилад В. Н. Бакушинського).

Номери спроб	Кут падання $i$	Кут заломлення $i'$	$\sin i$	$\sin i'$	$\frac{\sin i}{\sin i'} = n$

7. Який висновок можна зробити про хід променя в другому середовищі?

8. Чи існує пропорційність між кутами падання і заломлення?

9. Який висновок можна зробити про відношення синусів кутів падання і заломлення?

10. Які закони заломлення світла можна вивести із спроби?

152. Закони заломлення світла. Якщо направити ряд променів на межу двох середовищ, то можна спостерігати, що кожен промінь, проникаючи в друге середовище, змінює свій напрям, заломлюється.

Досліди показують, що, при переході світла з одного середовища в інше, в одних випадках кут заломлення менший кута падання, і промінь наближається до перпендикуляра (рис. 206, I); в інших випадках кут заломлення більший кута падання, і промінь віддаляється від перпендикуляра (рис. 206, II).

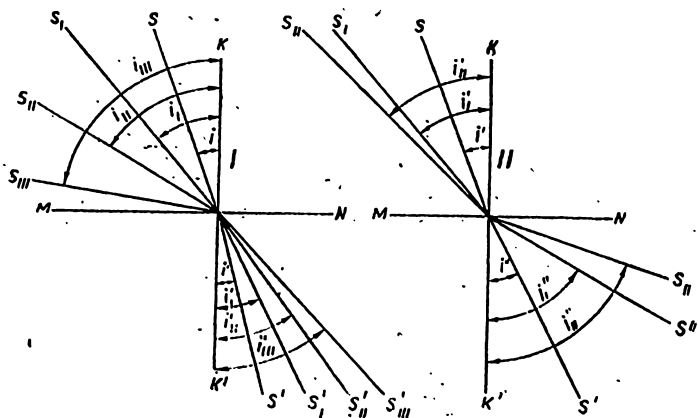


Рис. 206. Перехід променя з одного середовища в інше.

В перших випадках друге середовище вважається оптично більш густим, у других — менш густим, ніж перше.

Дослідження показують, що існує пропорційність між синусами кутів падання і заломлення. В наслідок порівняної

складності законів заломлення вони були відкриті<sup>1</sup> двома тисячоліттями пізніше законів відбивання.

1. Промінь заломлений лежить в одній площині з променем падаючим і перпендикуляром, поставленим до межі двох середовищ у точці падання.

2. Відношення синуса кута падання до синуса кута заломлення для даних двох середовищ є величина стала, що називається показником заломлення другого середовища відносно першого.

*Висновок з двох законів — оборотність променя: якщо пущити падаючий промінь в напрямі заломленого, то новий заломлений промінь вийде в напрямі попереднього падаючого.*

Якщо позначити показник заломлення другого середовища відносно першого через  $n$ , то:

$$n = \frac{\sin i}{\sin i'} \quad (1)$$

Легко зрозуміти, що показник заломлення першого середовища щодо другого виразиться оберненою величиною, тобто через  $n_1 = \frac{1}{n}$ .

Показник заломлення, вимірний при переході променя з пустоти в якунебудь речовину, називається абсолютним показником заломлення цієї речовини.

Деякі показники заломлення дано в такій таблиці:

Алмаз . . . . .	2,42	Скло (легкий крон) . . . . .	1,57
Скло (важкий флінт) . . . . .	1,80	Скляндар . . . . .	1,41
Вуглець-сульфід . . . . .	1,63	Синь . . . . .	1,36
Кам'яна сіль . . . . .	1,55	Вода . . . . .	1,33
Кварц . . . . .	1,55	Лід . . . . .	1,31
Канадський бальзам . . . . .	1,54	Повітря . . . . .	1,00029

#### Вправа 18.

1. Як відіб'ється і заломиться промінь, що падає перпендикулярно до поверхні?

2. Побудувати зображення світної точки у плоскому дзеркалі.

3. Побудувати зображення плоского предмета у плоскому дзеркалі.

4. Побудувати зображення горизонтального предмета в дзеркалі, нахиленому під кутом в  $45^\circ$  до горизонту; зробити те саме для вертикального предмета.

5. Нарисувати схему траншейного перископа і пояснити його дію йхід променів. Пояснити застосування перископа у підводних човнах.

6. Промінь падає перпендикулярно до дзеркала. Наскільки відхилиться відбитий промінь від падаючого, якщо дзеркало повернулось на кут  $\alpha$ ?

7. Сонячний промінь падає під кутом в  $24^\circ$  до горизонту. Під яким кутом до горизонту треба поставити плоске дзеркало, щоб сонячний промінь, відбиваючись, пішов горизонтально? Відп.  $78^\circ$  або  $12^\circ$ .

8. Який кут відбивання й заломлення в алмазі для променя, що падає під кутом в  $60^\circ$ ? Відп.  $21^\circ$ .

9. Кут заломлення в кварці дорівнює  $24^\circ$ . Який кут падання?

<sup>1</sup> Закони заломлення світла пробував відкрити ще Птолемей в 110 р.; відкрив їх Снелліус в 1620 р.; в сучасній формі установив їх Декарт в 1637 р.

10. Кут падання променя дорівнює  $50^\circ$ ; кут заломлення дорівнює  $28^\circ$ . Який показник заломлення? Відп. 1,6.

11. Кут відбивання дорівнює  $40^\circ$ , а кут заломлення —  $46^\circ$ . Що можна сказати про густину другого середовища відносно першого?

12. Промінь переходить з алмазу в пустоту і утворює кут заломлення, рівний  $90^\circ$ . Який кут падання? Розв'язати ту саму задачу для скла (кровоу) і води. Відп. Для алмазу  $24^\circ$ .

13. Чому палка в воді здається ламаною? В який бік направлений злом?

**153. Повне внутрішнє відбивання.** Вмістимо в приладі для заломлення (рис. 205) суцільний скляний або порожнистий півциліндр з рідиною і спрямуємо тепер світловий промінь через щільну на циліндричну поверхню. Стежачи за ходом заломленого променя всередині речовини, помітимо, що цей промінь, дійшовши до плоскої грані, що відокремлює речовину від

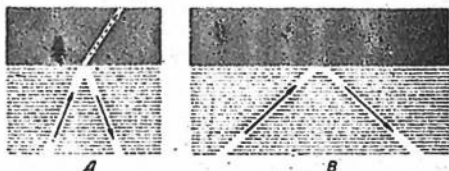


Рис. 207. Неповне (А) і повне внутрішнє (В) відбивання.

повітря, поділиться на цій межі на дві частини: одна відіб'ється всередині посудини за законами відбивання; друга заломиться і вийде в повітря віддалившись від перпендикуляра, тобто утворюючи кут заломлення, більший кута падання. Постараємося так переміщати півциліндр, щоб кут падання променя на плоску грань всередині речовини збільшувався. Ми помітимо тоді, що, поперше, промінь, який виходить у повітря, дедалі більше віддаляється від перпендикуляра; подруге, промінь вихідний стає дедалі блідіший; промінь, відбитий всередині речовини, — дедалі яскравіший. Нарешті, досягнувши якогось кута падання, промінь зовсім не виходить у друге середовище, цілком відбиваючись у першому.

Таке явище може настати тільки при паданні променя на межу, що відділяє більш густе середовище від менш густого. Тільки в цьому випадку кут заломлення більше кута падання і може досягти прямого кута, коли кут падання буде ще гострим.

Той кут падання, для якого кут заломлення стає рівним  $90^\circ$ , називається граничним кутом.

Відбивання променів, що падають під кутом, більшим граничного, на межу менш густого середовища, називається повним внутрішнім відбиванням.

Хід променів, що зазнають повного внутрішнього відбивання, зображено на рисунку 207.

Якщо позначити граничний кут падання з речовини в пустоту через  $i_0$  і згадати, що показник заломлення при переході з речовини в пустоту обернений показникові заломлення з пустоти в речовину, то граничні кути можна обчислити з формул:

$$\frac{\sin i_0}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{n}; \quad \boxed{\sin i_0 = \frac{1}{n}} \quad (II)$$

Граничні кути повного внутрішнього відбивання на межі з повітрям:

Алмаз . . . . . 24°  
Вуглець-сульфід . . . . . 38°

Скло різних сортів . . . . . 30—42°  
Вода . . . . . 49°

Явище повного внутрішнього відбивання дуже часто в природі. Бульбашки повітря в воді або склі, водяні павучки в воді здаються блискучими завдяки повному внутрішньому відбиванню світла на межі води або скла і повітря. Ті самі павучки, вийняті з води, є сірими. Явища міражів пояснюються повним внутрішнім відбиванням при переході світлових променів з більш густого шару повітря у менш густий.

В техніці користуються повним внутрішнім відбиванням на межі скла й повітря для зміни ходу променів при проектуванні горизонтальних предметів на екран, при освітленні підвальних приміщень тощо. Як відбувається така зміна ходу променів, можна зрозуміти з задачі 4 вправи 19.

**Вправа 19.**

1. Обчислити граничний кут повного внутрішнього відбивання для кварцу; скляного люду.

2. Промінь падає на межу води й повітря під кутом у 55°. Чи вийде він у повітря?

3. Всередині якого лінійного кута лежать промені, що падають в одну точку межі кам'яної солі і пустоти і можуть вийти з кам'яної солі в пустоту?

4. Світловий промінь падає перпендикулярно на грань (катет) скляної призми, переріз якої має форму різнобедреного прямокутного трикутника. Нарисувати дальший хід променя.

5. Скляна призма має в перерізі рівносторонній трикутник. Промінь світла падає перпендикулярно до грані на віддалі однієї третини сторони від якоїнебудь вершини. Нарисувати дальший хід променя.

6. Під яким кутом до радіуса має падати світловий промінь на водну кулясту каплю, щоб на внутрішній межі її вийшло повне внутрішнє відбивання?

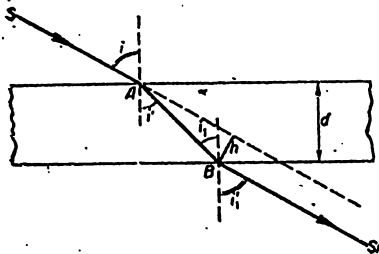


Рис. 208. Хід променя через пластинку з паралельними гранями.

154. Хід променя через пластинку з паралельними гранями. Якщо на скляну пластинку з паралельними гранями падає світловий промінь SA (пучок паралельних променів) (рис. 208), то на межі скла промінь ділиться на дві частини, з яких одна відбивається, друга заломлюється в склі в напрямі AB. На другій межі промінь AB також почасти відбивається, почасти заломлюється при переході в повітря в напрямі BS'. Простежимо тільки за вихідним променем. На першій межі кути падання  $i$  і заломлення  $i'$  зв'язані співвідношенням:

$$\frac{\sin i}{\sin i'} = n.$$



На другій межі при переході із скла в повітря кути падання  $i_1$  і заломлення  $i'_1$  зв'язані співвідношенням:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i'_1} = \frac{1}{n}$$

Від перемноження знайдемо:

$$\frac{\sin i \cdot \sin i_1}{\sin i' \cdot \sin i'_1} = 1.$$

З паралельності граней виходить, що  $i_1 = i'$ . Тоді:

$$\sin i_1 = \sin i' \quad i'_1 = i.$$

Через те що грані паралельні, то з рівності кутів  $i$  і  $i'_1$  випливає, що промінь  $BS'$  паралельний променеві  $SA$ .

Звідси висновок: при проходженні променя через пластинку з паралельними гранями промінь вихідний паралельний променеві падаючому і тільки зміщується від нього на якусь віддаль.

При розгляданні предмета через пластинку з паралельними гранями ми бачимо його в напрямі вихідного променя, і він здається зміщеним щодо свого дійсного положення.

Величина зміщення  $h$  збільшується із збільшенням кута падання  $i$ , товщини пластинки  $d$  і показника заломлення  $n$ .

Обчислення величини зміщення пропонується зробити в задачах 1—3 вправі 20.

При розгляданні предметів через віконне скло всі предмети здаються зміщеними. Але через те що товщина скла мала, то це зміщення не помітне, за винятком тих випадків, коли скло має первіномірну товщину.

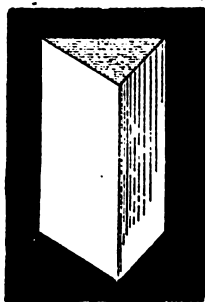


Рис. 209. Оптична призма.

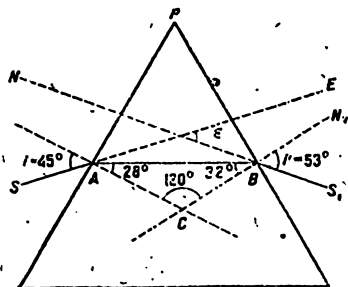


Рис. 210. Хід променя через призму.

155. Хід променя через призму. Візьмо призму з трикутною основою (рис. 209). Дві грані, через які проходить промінь, називаються заломними гранями; їх ребро — заломним ребром; лінійний кут між ними — заломним кутом призми.

Хід променя з повітря через скляну призму зображено на рисунку 210. Як видно з побудови, промінь світла відхиляється призмою з речовини більш густої, ніж навколишнє середовище, в сторону її основи. Предмет, розгляданий через таку призму, здається відхиленим до вершини заломного кута.

Кут між напрямом кута падаючого і вихідного називається кутом відхилення.

### Вправа 20.

1. Промінь  $SA$  падає на скляну пластинку (кром) з паралельними гранями (рис. 208) під кутом в  $30^\circ$  до нормалі. Під яким кутом він вийде з пластинки? Чому дорівнюватиме зміщення вихідного променя, якщо товщина пластинки  $AB = d = 5 \text{ см}$  і якщо  $d = 0,5 \text{ см}$ ? Відп.  $\approx 1 \text{ см}$ ;  $\approx 1 \text{ мм}$ .

2. Розв'язати попередню задачу для кута падання в  $50^\circ$ . Відп.  $1,9 \text{ см}$ .

3. Розв'язати задачі 1 і 2, якщо пластинка буде з скла флінту.

4. Побудувати хід через призму з флінту двох променів, що падають з однієї точки під кутами в  $30^\circ$  і  $40^\circ$  на грань  $AB$  (перший промінь ближче до вершини  $A$ ). Знайти побудовою і вимірюванням за допомогою транспортира кут відхилення для кожного з променів і знайти зображення світної точки. Кути призми:  $\angle A = 60^\circ$ ;  $\angle B = 50^\circ$ . Відп. Для другого  $\approx 51^\circ$ .

5. Уявити собі всередині води пустоту в формі призми попередньої задачі і нарисувати хід променів для цього випадку, якщо при цьому використати дані попередньої задачі.

**156. Швидкість світла.** Починаючи від середини XVII століття до цього часу, швидкість світла вимірювалась різними прийомами — астрономічними й фізичними. Ми спинимося на самому першому і самому останньому методах вимірювання.

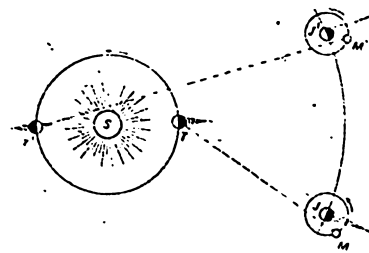


Рис. 211. Визначення швидкості світла способом Ремера.

До середини XVII століття в наслідок невдач усіх спроб визначити швидкість світла панувала думка, що світло від джерела до спостерігача доширюється моментально.

1. **Метод Ремера.** В 1675 році датський учений Ремер, спостерігаючи затемнення одного з супутників планети Юпітера (рис. 211), міг точно встановити час між двома послідовними входами або виходами супутника з тіні, відкидуваної планетою.

Зробивши ці спостереження при положенні Землі на найближчій віддалі її  $T$  від Юпітера  $J$ , Ремер за цими даними міг розрахувати момент виходу супутника з тіні через півроку при положенні Землі на найбільшій віддалі її  $T'$  від  $J$ .

Спостерігаючи, Ремер помітив, що дійсна поява запізнилася порівняно з обчисленою майже на 1000 секунд. Таке розходження Ремер приписував тому, що в цьому другому положенні світлу треба було пройти зайвий, порівняно з першим, шлях, рівний приблизно діаметрові земної орбіти.

Через те що діаметр орбіти був відомий (округлено 300 000 000 км), то, знаючи шлях і час, Ремер міг обчислити швидкість світла (округлено 300 000 км/сек).

2. *Метод Майкельсона.* Фізичні методи основані на тому, щоб вимірювати час проходження світла між двома точками на земній поверхні, які знаходяться на певній віддалі. Але при величезній швидкості світла світловий промінь за 1 сек. може пройти шлях в  $7\frac{1}{2}$  раз більший земного екватора. Тому між будь-якими точками на земній поверхні світло проходить віддаль за дуже малі частини секунди. Головна трудність при вимірюванні швидкості світла фізичними методами і полягає у відліку зникаюче малих відрізків часу.

Цю трудність подолано було так в одному з останніх вимірювань швидкості світла, проведеному американським фізиком Майкельсоном в 1928 році.

Промінь світла повинен був пройти прямий і зворотний шлях між двома горами (Вільсон і Сан-Антоніо, віддаль між якими близько 35 км). На одній горі поміщалося потужне джерело світла А (рис. 212). Один із пучків світла АВ відбивався від грані

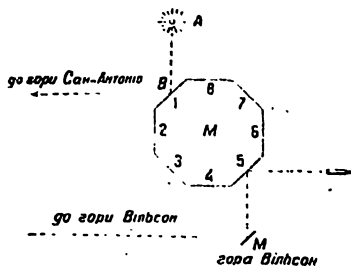


Рис. 212. Встановлення приладів для визначення швидкості світла способом Майкельсона.

восьмигранного дзеркала (наприклад від 1-ої грані) і спрямовувався в сторону другої гори. На цій другій горі промінь відбивався назад до першої і відбиванням відкидався на грань восьмигранного дзеркала, паралельну першій (наприклад на 5-у). Від цієї останньої грані промінь спрямовувався до ока спостерігача.

Коли дзеркало буде приведено в обертання, то можливі два випадки. Або за час проходження світла від однієї гори до другої і назад дзеркало повернеться на  $\frac{1}{8}$  частину оберту так, що на місце 5-ої грані стане точно в таке ж положення грань 6-а, і останній відбитий промінь піде в тому ж напрямі, що й при дзеркалі в спокої: тоді спостерігач бачитиме джерело світла. Або за час проходження світлом ззначеного шляху дзеркало повернеться не на  $\frac{1}{8}$  оберту; тоді грань, що йде за 5-ою, не займе точно такого ж положення, як 5-а, і останній відбитий промінь піде по іншому шляху, минаючи око спостерігача.

Спостереження ведеться так: спостерігачем уловлюється світло при нерухомому дзеркалі; потім дзеркало приводиться в обертання; джерело світла стає невидимим; швидкість обертання дзеркала збільшується доти, поки знову не стане видимим джерело світла. Його поява показує, що за час проходження світла між горами стався поворот дзеркала на  $\frac{1}{8}$  частину оберту<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> При збільшенні швидкості це може статися через  $\frac{2}{8}$ ,  $\frac{3}{8}$  і т. д. обертів.

Дзеркало робило 530 об/сек. Тривалість однієї восьмої частини оберту становить  $\frac{1}{4240}$  сек. Ділячи подвійну точно виміряну від-  
даль між точками спостереження на час в  $\frac{1}{4240}$  сек., Майкель-  
сон знайшов швидкість світла в повітрі в 299 711 км/сек.

Звідси швидкість світла в пустоті дорівнює 299 796 км/сек з точністю до 1 км/сек. Округлено береться швидкість світла  $c = 300\,000$  км/сек.

Фуко у Франції і Майкельсон в Америці виміряли безпосередньо швидкість світла у воді і знайшли, що вона в  $\frac{4}{3}$  раза менша, ніж у пустоті.

### ЗАПИТАННЯ.

1. Як вимірюється швидкість світла в повітрі? Чому дорівнює швидкість світла в пустоті?
2. Що називається кутом падання? кутом відбивання? кутом заломлення?
3. Що таке відбивання світла і які його закони?
4. Що таке заломлення світла і які його закони?
5. Що називається показником заломлення і чому він дорівнює?
6. Що називається повним внутрішнім відбиванням?
7. Які умови повного внутрішнього відбивання?
8. Що називається і як обчислюється граничний кут повного внутрішнього відбивання на межі середовища з більшою густиною і меншою густиною?
9. Навести приклади з природи і їх застосування в техніці явищ відбивання заломлення і повного внутрішнього відбивання.
10. Який хід променя, що проходить через пластинку, обмежену паралельними гранями?
11. Від чого залежить величина зміщення променя, що пройшов через пластинку з паралельними гранями?
12. Що називається кутом відхилення при проходженні променя через призму?
13. Куди зміщується зображення предмета, розгляданого через призму?

157. Джерела світла. Природними джерелами світла є самосвітні тіла, серед яких найголовніше місце займає Сонце. Світлова енергія, що посилається на Землю зорями та іншими світними небесними тілами, дуже мала порівняно з енергією Сонця. Другим природним джерелом світла є свічення газів при проходженні через них електрики (наприклад полярне сяйво).

Свічення супроводить велику кількість хімічних реакцій, що проходять з виділенням теплоти. Таке свічення називається хемілюмінесценцією. Прикладами такого свічення є свічення твердого фосфору при окисації, свічення багатьох рідин, що окисидуються в присутності водень-пероксиду, свічення газів (полум'я) при відсутності в них твердих частинок.

Окремий випадок хімічного свічення являє свічення деяких живих організмів (біоломінесценція) — риб, жуків, черв'яків, інфузорій.

Цікаво відмітити, що живі джерела світла дають дуже високий коефіцієнт корисної дії: з хімічної енергії вони перетворюють у світлову до 50%.

Свічення виникає також при кристалізації, при розламуванні кристалічних тіл, наприклад, дукру; при терті, наприклад, при розмотуванні ізоляційної стрічки.

Сучасні штучні джерелá світла, що мають практичне значення, оснований на горінні, на розжарюванні твердих тіл електричним струмом, на збудженні свічення газів електрикою, що через них проходить.

158. Міжнародна свічка. Люмен. Джерела світла відрізняються одне від одного якісно і кількісно. Запалений сірник як джерело світла зовсім не те, що кімнатна електрична жарова лампочка, і остання не схожа на вольтову дугу.

Для порівняння джерел світла треба було б взяти якенебудь з них за зразок, або так званий еталон, джерела світла. За міжнародною угодою спершу трьох країн: Англії, США і Франції, а пізніше СРСР і інших країн за еталон джерелз світла взято міжнародну свічку<sup>1</sup>.

Як реальний приклад найближче підходить до міжнародної свічки горяща стеаринова шестирикова (близько 70 г) свічка. Позначення міжнародної свічки — *sv*.

Про якості джерела світла можна судити з кількості випромінюваної ним енергії. Кількість світлової енергії, що проходить через якунебудь площадку за одиницю часу, називається світловим потоком через цю площадку.

Потік енергії відносять до певної просторової величини. За таку величину береться просторовий (тілесний) кут, що дорівнює одиниці, яка називається стерadianом.

За одиницю тілесного кута береться частина простору, що лежить всередині конуса, який має вершину в центрі кулі, а основою частину поверхні кулі, чисельно рівну квадратові радіуса (рис. 213).

Якщо радіус дорівнює 1 м, то одиниця тілесного кута спратиметься на частину поверхні кулі в 1 м<sup>2</sup>. Через те що поверхня кулі дорівнює 4πR<sup>2</sup>, то тілесний кут навколо однієї точки дорівнюватиме 4π одиниць (стерадіанів).

Одиниця світлового потоку (світлова одиниця енергії) називається люмен<sup>2</sup>.

*Люмен є світловий потік всередині одиниці тілесного кута, випромінюваний з вершини його точковим джерелом світла в одну міжнародну свічку.*

<sup>1</sup> У кожній з держав, що приєднались до угоди, є ряд (у нас 24) старанно заіренних між собою електричних-жарових лампочок, що горять при певній напрузі, і кожна з них виражена через відповідне число міжнародних свічок. Треба мати на увазі, що лампочки в 1 міжнародну свічку як зразка не існує. Всі еталони різних країн містять многократну кількість міжнародних свічок і як такі служать зразками. Отже, одна міжнародна свічка є нездійснена в житті, але певна частина кожної із зразкових ламп.

<sup>2</sup> Люмен латинською мовою означає світло.

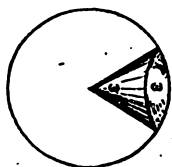


Рис. 213. Стерадіан.

Звичайні джерела світла — газові лампи, жарові лампочки тощо — виявляють різні сили світла в різних напрямках. Тому для джерел світла визначають або середню силу світла, або силу світла в даному напрямі (горизонтальну силу світла, вертикальну силу світла тощо).

159. Освітленість. Освітлення всякого предмета визначається величиною, що називається освітленістю.

*Освітленість поверхні вимірюється світловим потоком, що падає на одиницю поверхні.*

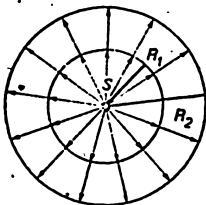


Рис. 214. До введення першого закону освітленості.

Якщо світловий потік позначити буквою  $\Phi$ , поверхню, на яку падає цей потік, буквою  $S$  і освітленість поверхні буквою  $E$ , то  $E = \frac{\Phi}{S}$ .

Техніка освітлення заснована на двох законах освітленості.

Перший закон, відкритий Ламбертом (1728 — 1777), встановлює залежність освітленості поверхні від її віддалі до джерела світла при умові перпендикулярності променів до поверхні.

Щоб вивести його, уявимо собі, що точкове джерело світла посилає в усіх напрямках рівномірно світловий потік  $\Phi$ .

Якщо провести навколо точкового джерела дві сферичні поверхні радіусами  $R_1$  і  $R_2$  (рис. 214), то величини цих сферичних поверхонь будуть  $S_1 = 4\pi R_1^2$  і  $S_2 = 4\pi R_2^2$ , і освітленість їх:

$$E_1 = \frac{\Phi}{4\pi R_1^2}; \quad E_2 = \frac{\Phi}{4\pi R_2^2},$$

звідки:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\Phi \cdot 4\pi R_1^2}{\Phi \cdot 4\pi R_2^2}, \quad \text{або} \quad \boxed{\frac{E_2}{E_1} = \frac{R_1^2}{R_2^2}} \quad (IIIa)$$

Звідси перший закон освітленості:

**При освітленні точковим джерелом світла освітленість поверхні обернено пропорціональна квадратові віддалі її від джерела світла.**

Отже, якщо віддалити поверхню на віддаль втричі більшу, ніж раніше, її освітленість зменшиться в 9 раз, якщо ж наблизити на віддаль вдвоє меншу, ніж раніше, то освітленість збільшиться в чотири рази.

Якщо поверхня освітлюється паралельними променями, то освітленість не залежить від віддалі поверхні від джерела світла.

В цьому разі легко бачити, що кількість енергії, яка припадає на дану площу, поставлену перпендикулярно до проміння, лишається одна й та ж, коли площадка переміщується паралельно

самій собі. Звичайно, при розрахунку не береться до уваги можливість вбирання променевої енергії середовищем.

Освітленість змінюється, коли змінюється кут падіння променів на поверхню, коли освітлення дається променями похилими, замість перпендикулярних. Справді, візьмомо прямокутник (рис. 215), у якого одна сторона  $AB$  лежить у площині рисунка, а друга, завдовжки  $1\text{ см}$ , лежить перпендикулярно до рисунка; тоді площа цієї фігури  $S = 1 \cdot AB = AB$  квадратних сантиметрів і освітленість її  $E = \frac{\Phi}{AB}$ .

Але той самий світловий потік  $\Phi$  падає на іншу площу  $S_0$  прямокутника з сторонами  $AC$  і  $1\text{ см}$ , поставленого перпендикулярно до променів. Ця площа  $S_0 = 1 \cdot AC = AC$  квадратних сантиметрів і освітленість її  $E_0 = \frac{\Phi}{AC}$ .

Порівнюючи першу освітленість з другою,

знаходимо:  $\frac{E}{E_0} = \frac{\Phi \cdot AC}{\Phi \cdot AB}$ , або  $\frac{E}{E_0} = \frac{AC}{AB}$ . Із  $\triangle ACB$  маємо:

$$\frac{AC}{AB} = \cos i, \text{ тоді } \frac{E}{E_0} = \cos i,$$

або

$$E = E_0 \cos i.$$

(III6)

Звідси другий закон освітленості:

**Освітленість поверхні паралельними променями прямо пропорційна косинусові кута падіння променів.**

Освітленість косими променями постійно має місце при освітленні Землі сонячним промінням: протягом доби із зміною положення Сонця на небі безперервно змінюється освітленість земної поверхні.

160. Одиниця освітленості і формула освітленості. З допомогою одиниці сили світла джерела установлюється і одиниця освітленості поверхні.

За одиницю освітленості береться освітленість, яку створює одна свічка на площадці, що перпендикулярна до світлових променів і віддалена на  $1\text{ м}$  від джерела. Ця одиниця освітленості називається люкс<sup>1</sup>.

Те саме означення можна висловити інакше: за одиницю освітленості береться освітленість поверхні, яка на площу в  $1\text{ м}^2$

<sup>1</sup> Люкс латинською мовою означає світло.

дістає рівномірно розподілений по ній світловий потік в 1 люмен<sup>1</sup>.

Приклад. Одна свічка на віддалі 1 м дає освітленість в 1 люкс, 10 свічок дадуть на тій же віддалі 10 люксів і 36 свічок дадуть 36 люксів. Але 36 свічок на віддалі 2 м дадуть освітленість в 4 рази меншу (§ 159), тобто 9 люксів, на віддалі 4 м — в 16 раз меншу, тобто 2,25 люкса; на віддалі 10 м — в 100 раз меншу, тобто 0,36 люкса; на віддалі  $\frac{1}{2}$  м — в 4 рази більшу, тобто 144 люкса.

Взагалі, якщо силу світла джерела позначити через  $I$  свічок, то освітленість поверхні на віддалі  $R$  метрів від цього джерела :

$$E = \frac{I}{R^2} \text{ люксів.} \quad (IV)$$

Гігієна встановлює для різних видів занять норми освітленості. Так, для читання вважається нормальною освітленість у 50 люксів.

Найбільша освітленість, при якій око ще може розрізнити предмети на білому фоні, дорівнює 2 000 000 люксам, найменша — близько 0,00003 люкса, найкраща — між 10 і 10 000 люксів. Чим дрібніша робота (у годинниківів, граверів, рисувальників і т. ін.), тим сильніша повинна бути освітленість. При цьому необхідно дбати про те, щоб освітленість була як можна рівніша (треба вище підвищувати сильні джерела світла, застосовувати доцільно влаштовані відбивачі), бо попадання в око проміння безпосередньо від сильного джерела світла або різке чергування світла й тіні безумовно шкідливе для зору.

Очі не зносять яскравості<sup>2</sup> джерела, якщо безпосередньо дивитися на нього, понад  $0,75 \frac{св}{см^2}$  (0,75 свічки на  $1 см^2$  світної поверхні). Стеаринова свічка дає  $0,5 \frac{св}{см^2}$ ; газова лампа —  $1,5 \frac{св}{см^2}$ ; пустотна лампа з вольфрамовою ниткою —  $200 \frac{св}{см^2}$ ; газонаповнена з потужністю в 100 ватів —  $580 \frac{св}{см^2}$ ; Сонце —  $200\,000 \frac{св}{см^2}$ .

Світлотехніка виробила норми освітленості для різних видів робіт і для різних приміщень.

<sup>1</sup> За ОСТ 4891 встановлюється інша одиниця освітленості: фот (по-грецьки фотос — світло). Фот є освітленість поверхні, яка на площу в  $1 см^2$  дістає рівномірно розподілений по ній світловий потік в 1 люмен; фот містить 10 000 люксів.

<sup>2</sup> Яскравість світла джерела вимірюється силою світла з  $1 см^2$  поверхні джерела, перпендикулярної променеві зору.



### Норма освітленості для різного виду робіт.

Назва робіт і приміщень	Освітленість в люксах
1. Дрібні й тонкі роботи (годинникаря, гравера, ткацтва темних матеріял, тонке прядіння, рисування тощо)	100
2. Роботи, зв'язані з застосуванням небезпечних дрібних різальних інструментів: різців, свердел, фрезів та ін.	100
3. Дрібна точна робота на верстатах; шиття на швейних машинах; конторські й писемні роботи	75
4. Читання, спостереження за показом різних інструментів; прядіння	50
5. Роздягальні	25
6. Проходи в приміщеннях	10
7. Сходи	8
8. Двори, проїзди	2

Для економнішого освітлення і для рівномірнішого розподілу освітленості по поверхні всередині приміщень має велике значення колір стін і стель.

Баригове білито відбиває 99% світла, що на нього падає; цинкове білито — 94%, свинцеве — 93%, крейда — 84%; білий папір відбиває 82%; жовті шпалери — до 40%, голубі — до 25%, тоді як чорне сукно дає тільки 1,2%, чорний бархат — 0,2%.

#### **Вправа 21:**

1. Яку освітленість дає 25-свічкова лампа, що висить на висоті 76 см від стола? *Відп.*  $\approx$  43 люксн.
2. Чи дасть нормальну для читання освітленість лампа в 100 свічок на висоті в 1,5 м?
3. На якій висоті над столом треба повісити 32-свічкову лампочку, щоб маги на столі нормальну освітленість? *Відп.* 80 см.
4. Коли буде більша освітленість: від лампочки в 200 свічок на віддалі 4 м чи від лампочки в 25 свічок на віддалі 1,2 м?

**161. Вимірювання сили світла джерела.** Для вимірювання сили світла джерел треба помістити їх так, щоб вони давали однакову освітленість поверхні. Якщо перше джерело дає освітленість  $E$  люксів на віддалі  $R_1$  метрів, то за формулою (IV) його сила світла дорівнює  $I_1 = ER_1^2$  свічок; якщо ту саму освітленість  $E$  люксів дає інше джерело на віддалі  $R_2$  метрів, то його сила світла дорівнює  $I_2 = ER_2^2$  свічок. Порівнюючи силу світла другого джерела з силою світла першого, матимемо:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{ER_2^2}{ER_1^2}; \quad \frac{I_2}{I_1} = \frac{R_2^2}{R_1^2}.$$

*Сили світла двох джерел відносяться, як квадрати віддалей їх від однаково освітлюваної ними поверхні.*

При порівнянні сил світла двох джерел необхідно встановлювати джерела так, щоб вони давали однакову освітленість якоїнебудь поверхні.

Для вимірювання сили світла одного джерела друге джерело повинно бути відомої сили світла (або може бути взяте за одиницю).

Прилади, призначені для вимірювання сили світла джерела, називаються фотометрами<sup>1</sup>.

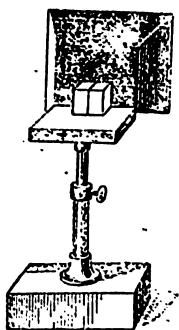


Рис. 216. Фотометр Жоллі.

162. Фотометр. Найуживанішою формою фотометра є фотометр з парафіновими пластинками (Жоллі). Він складається з екрану, посередині якого вирізане прямокутне віконце (рис. 216); позаду віконця підставляються дві однакові тісно складені пластинки парафіну, поділені тонким листком станіолу. Пластинки парафіну щільно закривають віконце; лінія їх поділу проходить посередині віконця. Фотометр поміщається на лінійку або стрічку масштабу, по обидва боки на рівні парафіну ставлять обидва порівнюваних джерела світла. Тоді одна пластинка парафіну освітлюється одним джерелом, друга — другим. Пересуваючи джерела, можна встановити їх так, щоб обидві пластинки були освітлені однаково. Коли їх так установили, вимірюють за масштабом віддалі джерел до лінії поділу пластинок. На підставі попереднього параграфа можна порівняти сили світла  $I_1$  і  $I_2$  двох джерел або виміряти одне з них, взявши друге за одиницю.

Якщо припустити, що  $I_1 = 1$  свічки, то :

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{R_2^2}{R_1^2}, \text{ або } I_2 = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 \text{ свічок.}$$

163. *Лабораторна робота 7. Порівняння сил світла двох джерел.*

Прилади: 1) фотометр, 2) масштаб у формі лінійки або стрічки, 3) дві підставки для джерел світла, 4) стеаринова свічка, газова лампа, різні електричні лампочки.

Хід роботи. 1. Поставте фотометр на масштаб і помістіть по обидва боки його свічку і газову лампу.

2. Перемишайте фотометр доти, поки освітленість обох пластинок не буде здаватися однаковою.

3. Виміряйте віддалі  $R_1$  і  $R_2$  від середини фотометра до свічки й лампи.

4. Обчисліть силу світла лампи  $I = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2$  свічок, взявши силу світла свічки за одиницю.

5. Змістіть фотометр і знову шукайте встановлення на рівну освітленість.

<sup>1</sup> По-грецькому фос—світло; метрео—міря.

6. Вимірюйте щоразу віддалі, записуючи числа в таблицю!

Номери спроб	Назва вимірюваного джерела	$R_2$	$R_1$	$I = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2$	Як уміщено джерело
Середнє для кожного джерела...					

7. Якщо лампа була спершу обернена до фотометра широкою стороною полум'я, поверніть її ребром і повторіть вимірювання.

8. Поставте на місце газової лампи електричну лампочку вертикально і горизонтально і зробіть вимірювання.

9. Вміщуйте, замість свічки, різні електричні лампи і порівнюйте їх з попередньою.

**Вправа 22.**

1. Віддаль одиниці світлового джерела від фотометра  $R_1 = 10$  см, а віддаль досліджуваного джерела  $R_2 = 25$  см. Чому дорівнює сила світла останнього джерела? *Відп. 6,25 од.*

2. Лампочка в 5 свічок на віддалі  $R_1 = 16$  см і друга лампочка на віддалі  $R_2 = 60$  см дають однакову освітленість. Знайти силу світла останньої. *Відп.  $\approx 70$  св.*

3. На якій віддалі над столом треба повісити лампочку в 100 свічок, щоб вона давала таку ж освітленість, як і лампочка в 25 свічок на віддалі 80 см? *Ві п. 1,6 м.*

4. Лампочка в 32 свічки висить над столом на віддалі 1,2 м; друга лампочка висить на висоті 2 м і дає таку ж освітленість. Яка її сила світла? *Відп.  $\approx 90$  св.*

**ЗАПИТАННЯ.**

1. Як вимірюється освітленість поверхні?
2. У чому полягає перший закон освітленості?
3. У чому полягає другий закон освітленості?
4. Що таке люкс?
5. Написати формулу для вимірювання освітленості.
6. Що таке міжнародна свічка?
7. На якому співвідношенні засновано порівняння сил світла джерел?
8. Як називається і яка будова прилада для порівняння сил світла джерел?

164. Керування ходом світлових променів. Змінювати природний хід світлових променів в необхідному для тих чи інших потреб напрямі можна з допомогою відбивання або заломлення світла.

Плоске дзеркало, поставлене на шляху променя, міняє його напрям (див. задачі 4, 5, 6, вправи 18). Дзеркало, поставлене під кутом в  $45^\circ$  до горизонтального променя, робить його вертикальним.

Якщо треба не тільки змінити напрям променя, але й дістати від того ж світлового потоку іншу освітленість того самого предмета, то користуються або відбиванням світла від сферичного (взагалі кривого) дзеркала, або заломленням його у

сферичному (взагалі обмеженому кривими поверхнями) склі, або в іншій прозорій речовині.

Ми не будемо гут повторювати відомих з початкового курсу фактів: будови перископа, світлової сигналізації і т. д.

**165. Формула сферичного дзеркала.** Сферичним дзеркалом називається частина поверхні кулі (звичайно з радіусом значного розміру). Якщо відбиваючою зроблена внутрішня поверхня кулі, дзеркало називається вгнутиим; якщо ж зовнішня, то називається опуклим.

Пряма, проведена через середину дзеркала  $O$  і центр сферичної поверхні  $C$ , називається головною оптичною віссю.

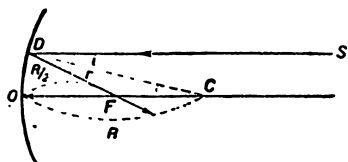


Рис. 217. Фокус  $F$  угнутого сферичного дзеркала.

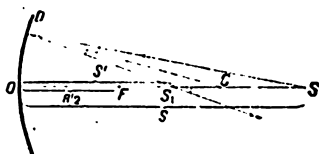


Рис. 218. Спряжені точки  $S$  і  $S_1$  угнутого сферичного дзеркала.

Якщо на поверхню вгнутого дзеркала упаде промінь  $SD$ , паралельний головній оптичній осі (рис. 217), під кутом  $i$ , то при своєму відбиванні він утворює кут  $r$ , рівний куту падання  $i$ . Перпендикуляром до поверхні в даному разі служить радіус  $CD$ , проведений у точку падання  $D$ . Але  $\angle i$  і  $\angle DCO$  рівні як різносторонні при паралельних  $SD$  і  $CO$ . Тому  $DF = FC$ . Якщо промінь  $SD$  лежить дуже близько до осі (так званий центральний пучок променів), то з дуже малою похибкою можна взяти  $DF = OF$ , тобто  $F$  є середина радіуса. Так само її для всякого іншого променя центрального пучка, паралельного головній осі, можна довести, що, відбившись, він перетне вісь в середині радіуса.

Звідси випливає висновок: *центральный пучок променів, паралельних головній оптичній осі, після відбивання від угнутого дзеркала, перетинає головну оптичну вісь в одній точці, що називається головним фокусом і лежить посередині радіуса.*

Віддаль  $OF$  називається головною фокусною віддаллю; вона позначається буквою  $f$  і дорівнює половині радіуса

$$f = \frac{R}{2}.$$

Якщо джерело світла  $S$  лежить на головній осі, то його промінь  $SD$  (рис. 218), утворивши при відбитті кут, рівний куту падання, перетне вісь у точці  $S_1$ . В  $\triangle SDS_1$  лінія  $CD$  буде бісе-

ктрисою і поділити супротивну сторону на відрізки, пропорційноальні двом іншим сторонам трикутника:

$$SC : CS_1 = SD : S_1D.$$

Якщо й тут брати промені, дуже близькі до осі, то без великої похибки можна взяти  $SD = SO$  і  $S_1D = S_1O$ .

Позначимо віддаль світлої точки від дзеркала  $SO$  через  $s$ , віддаль  $S_1O$  через  $s'$ . Тоді  $SC = s - R$ ;  $CS_1 = R - s'$ , і попередня рівність матиме вигляд:

$$\frac{s - R}{R - s'} = \frac{s}{s'}.$$

Всі дальші перетворення мають на меті привести цю рівність до вигляду, найзручнішого для запам'ятання:

$$ss' - Rs' = Rs - ss'; \quad 2ss' = Rs + Rs';$$

поділивши кожен частину на  $Rss'$ , матимемо:

$$\frac{2ss'}{Rss'} = \frac{Rs}{Rss'} + \frac{Rs'}{Rss'}; \quad \frac{2}{R} = \frac{1}{s'} + \frac{1}{s}; \quad \left[ \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \right] \quad (V)$$

Якщо ми пустимо з тієї ж точки  $S$  другий промінь на дзеркало, то для нього можна вивести таку ж рівність. Через те що для другого променя значення  $s$  і  $f$  лишаються тими самими, що й для першого, то і значення  $s'$ , що визначається написаним рівнянням, буде таким же. Звідси випливає, що промені, які виходять з якоїнебудь точки головної осі, яка лежить за центром (близькі до осі), перетинаються в одній точці, що лежить на головній осі між центром і фокусом. Точка  $S_1$  буде зображенням світлої точки  $S$ . Якщо джерело світла вмістити в точку  $S_1$ , то за властивістю оборотності променів при відбиванні зображення її буде в точці  $S$ . Тому дві точки головної осі — джерело світла і його зображення — називаються спряженими точками. Виведене вище рівняння називається формулою вгнутого дзеркала.

**166. Побудова зображення в сферичному дзеркалі.** Для зображення предмета треба знайти зображення окремих його точок. Щоб побудувати зображення точки, досить провести з неї два промені і знайти для них відбиті промені. Найпростіше можна вирисувати хід таких трьох променів: 1) падаючий — паралельний оптичній осі; відбитий — проходить через головний фокус; 2) падаючий — проходить через головний фокус; відбитий іде паралельно головній оптичній осі (за властивістю оборотності); 3) падаючий проходить через центр кривини дзеркала; відбитий повертається назад тим же шляхом. Для побудови зображення точки з перелічених трьох променів можна вибрати будьякі два.

<sup>1</sup> Дослідження цієї формули робиться так само, як і формули для лінз (див. § 70).

Рисунок 219 показує хід променів при побудові зображення відрізка  $AB$ , що посилає промені на дзеркало.

Виберемо з променів, що йдуть від точки  $A$ , промінь, паралельний головній осі  $AS_1$ ; він дає відбитий промінь, що йде через головний фокус  $S_1F$ . Другим променем виберемо промінь, що йде від  $A$  через центр  $C$  в точку  $T_1$ . Він відіб'ється назад.

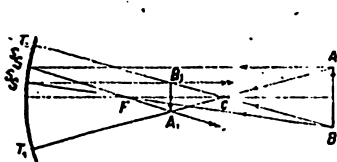


Рис. 219. Побудова зображення в угнутому сферичному дзеркалі, коли предмет знаходиться далі центра.

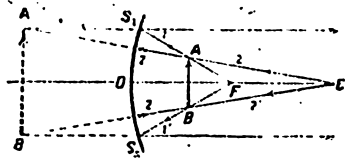


Рис. 220. Побудова зображення в угнутому сферичному дзеркалі, коли предмет лежить ближче фокуса.

Обидва відбиті промені перетнуться в точці  $A_1$ , яка буде зображенням точки  $A$ . Так само будемо зображення точки  $B$ . Виберемо промінь, що падає через головний фокус  $BS_3$ ; він, відбившись, піде паралельно головній осі. За другий промінь візьмемо центральний промінь  $BT_3$ , що відбивається в тому ж напрямі. Їх перетин  $B_1$  дасть зображення точки  $B$ . Відрізок  $A_1B_1$  буде зображенням відрізка  $AB$ .

Отже, коли предмет лежить за центром, його зображення дійсне, обернене, зменшене і лежить між центром і головним фокусом.

По рисунку 220 можна розібрати хід променів для того випадку, коли предмет лежить ближче головного фокуса; по ри-

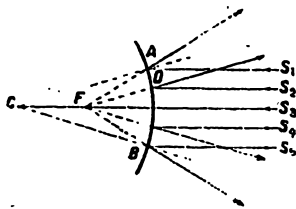


Рис. 221. Уявний фокус  $F$  опуклого сферичного дзеркала.

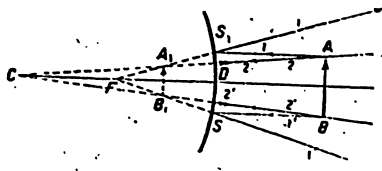


Рис. 222. Побудова зображення в опуклому сферичному дзеркалі.

сунку 221 — хід променів, що падають паралельно головній осі на опукле сферичне дзеркало; по рисунку 222 — побудову зображення в опуклому дзеркалі.

Відзначимо, що в усіх останніх випадках відбиті промені, що виходять з однієї точки джерела, не перетинаються. На рисунку можуть перетинатися тільки їх уявні продовження. Тому як добути зображення, так і головний фокус опуклого дзеркала називаються уявними.

Угнуте дзеркало, в фокусі якого розміщене джерело світла близько тисячі свічок, посиляє в простір паралельний пучок; освітленість поверхні, на яку цей світловий пучок падає, дуже повільно зменшується із збільшенням віддалі освітленої поверхні від джерела світла і зменшується тільки від непрозорості повітря. Такий прилад може давати значну освітленість на віддалі кілометрів; він називається прожектором і служить на війні для розшукувань уночі противника, особливо ворожих літаків (рис. 223).

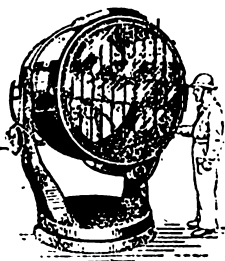


Рис. 223. Прожектор.

Серед багатьох інших технічних застосувань кривих дзеркал спинимося на застосуванні їх для перетворення сонячної енергії в механічну у так званих сонячних двигунах (рис. 224).

В Середній Азії поблизу Ташкента, а також і в інших країнах, наприклад поблизу Каїра (Африка), збудовані споруди, що складаються з багатьох полірованих пластин. Сонячне проміння, що падає на всю величезну поверхню цієї споруди, відбиваючись, іде в невелику трубу, що знаходиться всередині цієї споруди і містить у собі воду. Тепло сконцентровано на трубі соняч-

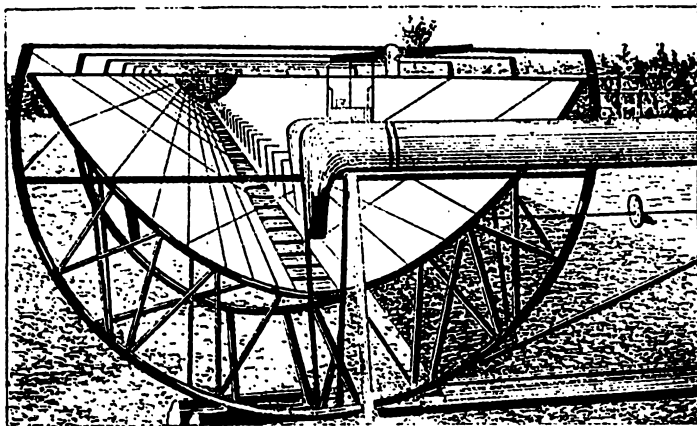


Рис. 224. Сонячний двигун.

ного проміння доводить воду до кипіння, і пара, що утворюється, іде в паровий двигун. Отже, виходить сонячний двигун, що перетворює сонячну енергію в енергію тепловою і механічну.

Вичерпання світових запасів мінерального палива ставить завдання удосконалити будову сонячного двигуна.

**167. Сферичні лінзи.** Як призма із заломної речовини відхилля промені, що на неї падають з повітря, до своєї основи, так змінюють хід променя і сферичні лінзи. Лінза називається сферичною, якщо вона з обох боків відшліфована по сферичній поверхні (або з одного — по сферичній, з другого — по плоскій).

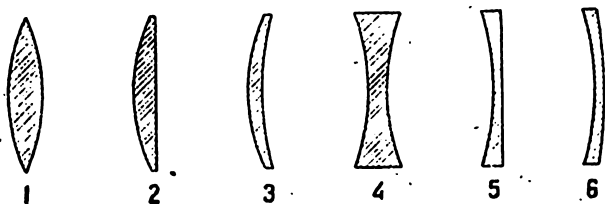


Рис. 225. Види сферичних лінз.

Види сферичних лінз зображені на рисунку 225: перша лінза називається двоопуклою, четверта — двогнутою. Ця назва застосовується і до інших сферичних стекел<sup>1</sup>. *Лінія, що проходить через центри сферичних поверхонь лінзи, називається головною оптичною віссю.*

Для всякої лінзи існує точка, через яку проходять промені, не міняючи свого напрямку. Вона лежить на головній оптичній осі і називається *оптичним центром лінзи*.

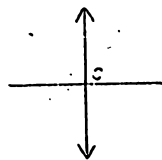


Рис. 226. Схематичне зображення опуклої лінзи.

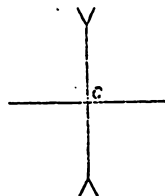


Рис. 227. Схематичне зображення вгнутої лінзи.

Всяка пряма, що проходить через оптичний центр під кутом до головної оптичної осі, називається *побічною оптичною віссю*. На рисунках тонкі лінзи зображаються схематично прямими лініями, що проходять через оптичний центр, при чому опуклі лінзи зображаються так, як

показує рисунок 226, а вгнуті — як рисунок 227.

Якщо поставити опуклу лінзу так, щоб на неї падало сонячне проміння, паралельне головній оптичній осі, то воно збереться в одній точці на її головній осі. *Та точка головної осі, в якій збирається проміння, що падає на опуклу лінзу паралельно її головній осі, називається головним фокусом лінзи* (рис. 228).

Якщо зробити таку ж спробу з угнутою лінзою, то промені, що падають на лінзу паралельно головній осі її, вийдуть з лінзи

<sup>1</sup> Взагалі оптичною лінзою називається прозоре тіло, обмежене двома правильними поверхнями (здебільшого сферичними), які служать для зміни збіжності світлового пучка, що проходить через нього.



розбіжним пучком. Але, як показує спроба й побудова, промені розходяться так, що вони ніби виходять з одної точки, яка лежить на їх продовженні. Та точка головної осі, через яку проходять продовження заломлених в угнутий лінзі розбіжних променів, які падають на неї паралельно головній оптичній осі,

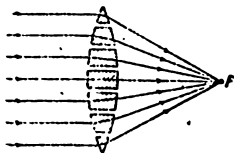


Рис. 228. Головний фокус  $F$  опуклої лінзи.

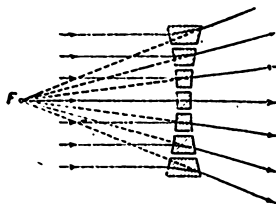


Рис. 229. Головний фокус  $F$  угнутої лінзи (уявний).

називається уявним головним фокусом (рис. 229). Як показують рисунки, опукла лінза подібна до призми, зближених основами, і відхиляє промені, що падають на неї, до основ, тобто до середини, вгнута — подібна до призми; зближених вершинами, і теж відхиляє промені до основ призми, тобто в даному разі до країв лінзи. В кожній лінзі є два фокуси, що лежать по обидві сторони її на рівних відстанях від оптичного центра.

### 168. Формула лінзи.

Щоб побудувати зображення предмета, треба будувати зображення окремих точок його. Для побудови зображення точки досить провести з неї два промені і знайти для них заломлені промені.

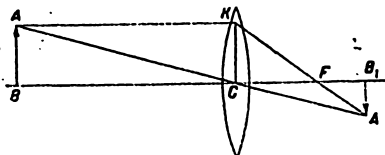


Рис. 230. До виведення формули лінзи.

Звичайно вибирають два з таких трьох променів, для яких напрям вихідного променя можна вирисувати без вимірювання кутів і обчислення за тригонометричними таблицями, а саме: 1) промінь падає паралельно головній оптичній осі, заломлений проходить через головний фокус; 2) промінь падає через головний фокус, заломлений іде паралельно головній оптичній осі; 3) промінь, що проходить через оптичний центр, іде через лінзу без зміни напрямку.

Щоб вивести формулу лінзи, візьмемо точку  $A$  (рис. 230) донебудь зліва від лінзи над головною віссю. Її віддаль по головній осі до лінзи (до її оптичного центра) позначимо через  $s$  (тобто  $CB = s$ ). Проводячи промінь, паралельний головній оптичній осі, і промінь, що збігається з побічною віссю, знайдемо зображення точки  $A$  в точці  $A_1$  перетину цих двох променів після проходження їх через лінзу. Віддаль точки  $A_1$  по головній осі до лінзи позначимо через  $s'$  (тобто  $CB_1 = s'$ ). Головна фокусна віддаль  $CF$  позначається через  $f$  (тобто  $CF = f$ ), тоді  $B_1F = s' - f$ .

З подібності трикутників  $ACB$  і  $A_1CB_1$ , маємо :

$$AB : A_1B_1 = CB : CB_1.$$

З подібності трикутників  $A_1FB_1$  і  $CFK$  випливає :

$$KC : A_1B_1 = CF : B_1F.$$

Через те що з прямокутника  $CKAB$  відрізок  $KC = AB$ , то ліві частини обох рівностей рівні; отже, повинні бути рівні і праві :

$$CF : B_1F = CB : CB_1.$$

Заміняючи члени пропорції, через введені раніше позначення, знаходимо

$$f : (s' - f) = s : s' ; f s' = s s' - f s ; f s + f s' = s s'.$$

Звідси можна обчислити головну фокусну віддаль :

$$f = \frac{ss'}{s + s'}.$$

Поділивши всі члени передостанньої рівності на добуток  $ss'$ , можна вивести формулу лінзи :

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}. \quad (VI)$$

тобто *сума обернених величин віддалей спряжених точок від центра лінзи дорівнює оберненій величині головної фокусної віддалі.*

Якщо за джерело світла взяти точку  $A_1$ , то її зображення, як видно з рисунка, буде в точці  $A$ . Ця ж властивість випливає з закону оборотності (§ 152) і з наведеної вище формули, де  $s$  і  $s'$  займають цілком однакове положення. Тому світна точка і її зображення називаються спряженими точками, і виведене рівняння називається формулою опуклої лінзи.

169. Збільшення зображення. Якщо в попередньому рисунку розглядати відрізок  $AB$  як предмет, то відрізок  $A_1B_1$  буде його зображенням. Відношення лінійного розміру зображення до лінійного розміру предмета називається збільшенням. З першої рівності попереднього параграфу видно, що збільшення

$$\frac{A_1B_1}{AB} = \frac{s'}{s},$$

тобто *збільшення лінзи дорівнює відношенню віддалі зображення від оптичного центра лінзи до віддалі предмета від нього.*

170. Зображення в лінзі при різних віддальях предмета від неї. Положення і розмір зображення можна одержати побудовою і обчисленням з формули лінзи (VI), а саме :

$$s' = \frac{fs}{s-f} \text{ або } s' = \frac{f}{1 - \frac{f}{s}}.$$

Перший випадок. Предмет знаходиться на надзвичайно великій віддалі на головній оптичній осі (в безконечності); від такого предмета промені йдуть паралельно головній оптичній осі і збираються в головному фокусі. Якщо  $s = \infty$ , то  $\frac{1}{s} = 0$ ;  $s' = f$ .

Другий випадок. Предмет лежить далі подвійної фокусної віддалі. Таким буває звичайно положення предмета при фотографуванні.

Якщо  $s > 2f$ , то  $\frac{1}{s} < \frac{1}{2}$ ;  $1 - \frac{1}{s} > \frac{1}{2}$  і  $s' < 2f$ ;  $A_1B_1 < AB$ , бо  $s' < s$ .

Побудова зображення дана на рис. 231.

Коли предмет лежить за подвійною фокусною віддаллю, його зображення — дійсне, обернене і зменшене і лежить між головним фокусом і точкою на подвійній фокусній віддалі.

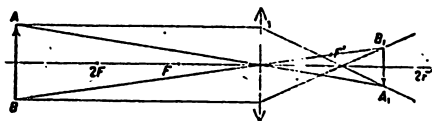


Рис. 231. Побудова зображення предмета в опуклій лінзі, коли предмет знаходиться за подвійною фокусною віддаллю.

Третій випадок. Предмет лежить на подвійній фокусній віддалі.

Якщо  $s = 2f$ , то  $\frac{1}{s} = \frac{1}{2}$ ;  $1 - \frac{1}{s} = \frac{1}{2}$ ;  $s' = 2f$ ;  $A_1B_1 = AB$ , бо  $s = s'$ .

Зображення побудоване на рисунку 232.

Коли предмет лежить на подвійній фокусній віддалі, його зображення — дійсне, обернене, рівне величиною предметові і лежить на подвійній фокусній віддалі.

Четвертий випадок. Предмет лежить між точкою на подвійній фокусній віддалі і головним фокусом. Таке, наприклад, положення предмета при проектуванні проекційним ліхтарем.

Якщо

$f < s < 2f$ , то  $\frac{1}{s} > \frac{1}{2}$ ;  $1 - \frac{1}{s} < \frac{1}{2}$ ;  $s' > 2f$ ;  $A_1B_1 > AB$ , бо  $s' > s$ .

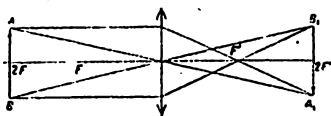


Рис. 232. Побудова зображення предмета в опуклій лінзі, коли він знаходиться на подвійній фокусній віддалі.

П'ятий випадок. Предмет лежить у головному фокусі.

Якщо  $s = f$ , то  $\frac{1}{s} = 1$ ;  $1 - \frac{1}{s} = 0$ ;  $s' = \infty$ , тобто  $s'$  перевищує

всяке, яке завгодно велике число. Як видно з ходу променів на рисунку 234, обидва промені, які своїм перетином повинні дати

зображення точки, ідуть паралельно і не перетинаються (або, як кажуть у математиці, перетинються в безконечності).

*Коли предмет у головному фокусі, його зображення не існує (воно відходить у безконечність).*

Шостий випадок. Предмет лежить між головним фокусом і лінзою.

Якщо  $s < f$ , то  $\frac{1}{s} > \frac{1}{f}$ ;  $1 - \frac{1}{s}$  — число від'ємне;  $s' = \frac{1}{1 - \frac{1}{s}}$

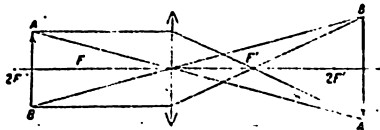


Рис. 233. Побудова зображення предмета в опуклій лінзі, коли він знаходиться далі фокусної, але ближче подвійної фокусної віддалі.

міру наближення предмета до лінзи, поки не зробиться коло самої лінзи рівним предметові.

Загальний огляд. В міру наближення предмета з безконечності до точки на подвійній відстані його зображення переміщується з багато меншою швидкістю з головного фокуса до точки, що лежить на подвійній фокусній віддалі по другий бік лінзи; розмір зображення збільшується до розміру предмета. При дальшому переміщенні предмета з точки на подвійній фокусній віддалі до головного фокуса його зображення переміщується за подвійну віддалі у безконечність з дедалі зростаючою швидкістю, більшою, ніж швидкість переміщення предмета. При переміщенні предмета від головного фокуса до лінзи зображення появляється з боку предмета, стає уявним, прямим і збільшеним, і йде слідом за предметом з швидкістю, значно більшою від швидкості переміщуваного предмета.

Побудова зображення для вгнутої лінзи показана на рисунку 236 на стор. 207.

*Зображення в вгнутій лінзі—завжди уявне, пряме, зменшене.*

є також число від'ємне, тобто  $s'$  направлено від лінзи в ту ж саму сторону, де лежить предмет. Хід променів при побудові зображення дано на рисунку 235.

*Коли предмет лежить між головним фокусом і лінзою, його зображення уявне, пряме, збільшене.*

Зображення зменшується в

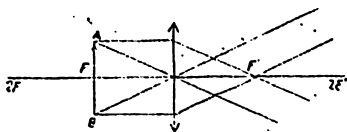


Рис. 234. Побудова зображення предмета в опуклій лінзі, коли предмет знаходиться у головному фокусі.

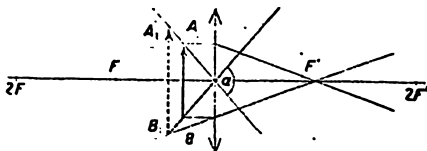


Рис. 235. Побудова зображення предмета в опуклій лінзі, коли предмет знаходиться ближче головного фокуса.

Рівняння спряжених точок для вгнутої лінзи :

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f}$$

Підсумовуючи дослідження ходу світлових променів у різних випадках, ми бачимо, що з допомогою плоских дзеркал, сферичних дзеркал, призм і лінз людство навчилося керувати ходом світлових променів.

Цим умінням воно користується для будовання всіх своїх оптичних приладів, для одержання паралельних або слабо розбіжних пучків променів в автомобільних ліхтарях, маяках і прожекторах, що набули такого великого значення у справі оборони країни.

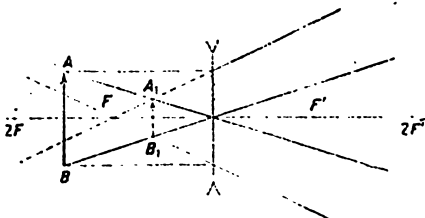


Рис. 236. Побудова зображення предмета в угнутій лінзі.

### 171. Лабораторна робота 8. Експериментальне вивчення властивостей лінз.

Прилади: 1) дві опуклі лінзи, одна довгофокусна, друга короткофокусна з підставками; 2) одна вгнута; 3) оптична лавка або лінійка — масштаб або стрічка міліметрового паперу; 4) екран на підставці; 5) екран з вирізом у формі стріли; 6) джерело світла.

Хід роботи. 1. Встановіть на одному кінці лави або лінійки, або стрічки екран з вирізом у формі стріли, освітіть його джерелом світла, потім на ту саму лаву поставте підставку з лінзою і екран.

2. Пересувайте лінзу і екран доти, поки на екрані не утвориться виразне зображення предмета.

3. Виміряйте віддаль від предмета до середини лінзи  $s$ , від середини лінзи до зображення  $s'$ , відзначте якість зображення і обчисліть за формулою  $f$ , записавши число в таблицю.

4. Зробіть 7—8 різних установлень і обчисліть середнє  $f$ .

5. Проробіть ті самі вимірювання для другої лінзи.

6. Скористуйтеся цими обчисленнями для перевірки висновків § 170.

При цьому постарайтесь зробити хоч би одне установлення так, щоб у ньому  $s$  дорівнювало  $s'$  одного з попередніх установлень, і порівняйте, чому дорівнюватиме в цьому випадку  $s'$ .

7. Направивши лінзу на Сонце, дістаньте фокус сонячного проміння, виміряйте фокусні віддалі з обох боків, візьміть середнє з них і порівняйте його з обчисленою фокусною віддаллю.

Номер вимірювання	$s$	$s'$	$f$	Якість зображень
1				
2				
	середнє			

8. Поставте на місце опуклої лінзи вгнуту і спробуйте дістати зображення від неї.

172. Оптична сила лінз. Для порівняння між собою оптичних властивостей різних лінз користуються не величиною фокусної віддалі  $f$  лінз, а оберненою величиною  $\frac{1}{f}$ . Величина  $\frac{1}{f}$  називається оптичною силою лінзи. Застосування цієї величини ґрунтується на чому. Чим довша головна фокусна віддаль, тим слабша заломна здатність лінзи і тим менший дріб  $\frac{1}{f}$ ; чим коротша фокусна віддаль  $f$ , тим сильніше заломлює лінза і тим більший дріб  $\frac{1}{f}$ . Отже, дріб  $\frac{1}{f}$  може служити характеристикою заломної здатності лінзи.

За одиницю оптичної сили лінзи береться *оптична сила такої лінзи, головна фокусна віддаль якої рівна 1 м*; така одиниця називається діоптрією. Оптична сила всякої лінзи дорівнює одиниці, поділеній на фокусну віддаль у метрах, при чому для опуклих лінз вона виражається додатними числами, а для вгнутих — від'ємними.

Так, якщо  $f = 20$  см, то оптична сила дорівнює  $\frac{1}{0,2} = 5$  діоптріям; якщо оптична сила дорівнює 2 діоптріям, то  $\frac{1}{f} = 2$ ;  $f = \frac{1}{2}$  м = 50 см.

Лінзи, застосовувані в оптичних приладах, характеризуються ще однією величиною, що називається світлосилою. Якість лінзи, застосовуваної, наприклад, для фотографічного апарата зумовлюється також і тією освітленістю, яку вона може дати на фотографічний пластиниці. Кількість же променів, що дають освітленість зображення, буде тим більша, чим більший отвір лінзи, тобто його діаметр, і чим сильніше заломлюються промені, тобто чим коротша фокусна віддаль. Тому *світлосила лінзи вимірюється відношенням діаметра до її фокусної віддалі*.

#### Вправа 23.

1. Скільки діоптріям дорівнює оптична сила опуклих лінз з  $f = 16$  см? 7,5 см? 1,5 м? вгнутих лінз з  $f = 1$  м? 6 м? 2 м?

2. Визначити головну фокусну віддаль  $f$  лінз, у яких оптична сила в діоптріях дорівнює  $+13\frac{1}{3}$ ;  $-16,6$ ;  $+2$ ;  $-0,5$ ;  $+0,75$ ;  $+0,4$ .

3. Чому із збільшенням зображення його освітленість зменшується?

4. У скільки разів освітленість зображення буде меншою освітленості плоского предмета, якщо лінійний розмір зображення більше предмета в 4 рази?

5. Знайти головну фокусну віддаль опуклої лінзи, якщо віддаль предмета від лінзи  $s = 24$  см, а віддаль його зображення  $s' = 40$  см.

6. Знайти оптичну силу опуклої лінзи, якщо  $s = 25$  см і  $s' = 1$  м.

7. Головна фокусна віддаль лінзи  $f = 16$  см,  $s = 36$  см. Знайти  $s'$  і збільшення лінзи. Відп. 5 діоптрій.

8. Оптична сила лінзи дорівнює  $16\frac{2}{3}$  діоптрій,  $s = 100$  см. Знайти  $s'$  і збільшення лінзи. Відп. 28,8 см.

9. Оптична сила лінзи дорівнює  $16\frac{2}{3}$  діоптрій,  $s = 100$  см. Знайти  $s'$  і збільшення лінзи. Відп.  $\approx 5,4$  см.

9.  $f = 12$  см,  $s = 10$  см. Знайти  $s'$  і збільшення лінзи.

Відп. -- 60 см.

10. Лінза проєкційного ліхтаря має  $f = 16$  см. На якій віддалі від лінзи треба поставити діапозитив, щоб його зображення проєктувалося на екран, який знаходиться на віддалі 2,16 м? Яке збільшення зображення?

Відп. 17,3 см.

11. Екран попередньої задачі поставлено на віддалі 1,6 м. В який бік і на скільки треба перемістити від лінзи діапозитив, щоб мати виразне зображення?

Відп. 0,5 см.

12. Оптична сила лінзи дорівнює  $13\frac{1}{3}$  діоптрій. Де треба вмістити предмет, щоб мати уявне зображення на віддалі 25 см?

Відп.  $\approx 5,8$  см.

13. Головна фокусна віддаль угнутої лінзи дорівнює 10 см,  $s = 12$  см. Знайти  $s'$ .

Відп. -- 5,5 см.

14. Оптична сила лінзи дорівнює 4 діоптрій;  $s = 20$  см. Знайти  $s'$ .

Відп. -- 1 м.

15. Висота будівлі на фотографічному знімку дорівнює 5 см. Фокусна віддаль об'єктива дорівнює 20 см. Апарат стояв при зйоманні на віддалі 75 м від будівлі. Знайти висоту будівлі.

Відп.  $\approx 18$  м.

16. Для повітряної розвідки з літака на висоті 3000 м треба зробити знімки з місцевості в масштабі 1:5000. Якою повинна бути фокусна віддаль об'єктива?

Відп. 60 см.

173. **Проекційний ліхтар.** Лінзи застосовуються в проекційному ліхтарі. Призначення проекційного ліхтаря давати на екрані дійсне, збільшене зображення картини або предмета. Таке зображення може одночасно бачити велика кількість людей і на великій віддалі. Рисунок 237 зображає схему ліхтаря; рисунок 238 — його загальний вигляд; рисунок 233 дає хід променів у ньому.

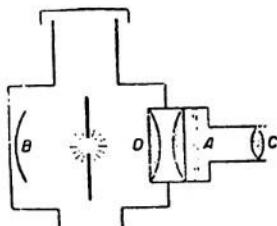


Рис. 237 Схема проекційного ліхтаря.

Головну частину ліхтаря становить опукла лінза С — об'єктив. Через те що зображення повинні бути дійсні і збільшені, то предмет повинен знаходитися за фокусом, але в усякому разі ближче подвійної фокусної віддалі. Зображення повинно бути сувільно збільшене; при збільшенні його лінійних розмірів у 20 раз

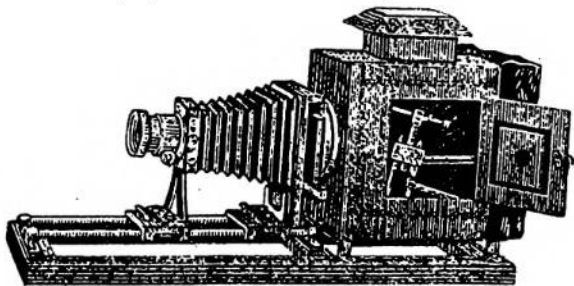


Рис. 238. Загальний вигляд проекційного ліхтаря.

його площа збільшується в  $20^2 = 400$  раз і тому в 400 раз зменшується освітленість його зображення. Щоб зображення і при більших збільшеннях лишалося досить добре освітленим, освітленість самого предмета повинна бути надзвичайно посилена. Цим пояснюються всі інші деталі будови ліхтаря.

Від усякого джерела світла енергія поширюється в усіх напрямках, і значна частина її пропадає марно для освітлення проєктованого предмета. Для уловлювання частини цієї пропадаючої енергії між джерелом світла і предметом поміщається „конденсор“ — сукупність збірних лінз, що зосереджують на предметі збіжний пучок променів.

Будова конденсора — згущувача променів — показана на рисунку 237 під буквою *D*.

Люді на задній стороні ліхтаря укріплюється вгнуте дзеркало *B* (рис. 237) так, щоб джерело світла було в його центрі. Його призначення — відбивати в бік предмета ту частину енергії, яка падає на задню частину ліхтаря. Отже, призначення об'єктива — давати зображення; призначення всіх інших частин — посилювати освітленість предмета до такої міри, щоб освітленість зображення, не зважаючи на збільшення його площі в сотні раз була досить великою.

Для одержання на екрані зображень непрозорих предметів застосовуються спеціальні прилади — епідіаскопи.

#### Вправа 24.

1.  $f$  об'єктива ліхтаря дорівнює 15 см; віддаль об'єктива до екрана  $s' = 1,6$  м; знайти віддаль  $s$  предмета від об'єктива і збільшення.

*Відп.*  $s = 16,5$  см; збільшення майже в 10 раз.

2.  $f$  об'єктива дорівнює 18 см; віддаль  $s$  предмета від об'єктива дорівнює 20 см; знайти віддаль екрана і збільшення.

*Відп.*  $s' = 1,8$  м; 9 раз.

3.  $f$  об'єктива дорівнює 30 см, і зображення утворюється на віддалі 8,65 м. Як треба пересунути предмет, щоб мати зображення на віддалі 12,25 м?

*Відп.* На 0,3 см до об'єктива

4.  $f$  об'єктива дорівнює 40 см. На якій віддалі поставлено предмет, якщо лінійне збільшення дорівнює 20?

*Відп.* 12 см.

5. Яка  $f$  об'єктива, якщо предмет поставлено на віддалі 18 см, а збільшення дорівнює 10?

*Відп.* 16,4 см.

**174. Фотографічний апарат.** Фотографічний апарат призначається для виконання фотографічного здіймання. Основними частинами його є: камера, об'єктив-лінза, обернена до предмета, затвор, касети.

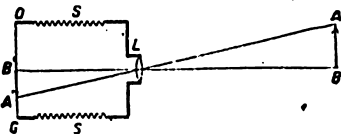


Рис. 239. Схема фотографічного апарата.

Зображення здебільшого виходить зменшене, отже, предмет поміщається далі подвійної фокусної віддалі. Рисунок 239 зображає схему апарата, а хід променів дано на рисунку 231.

При наведенні апарата об'єктив апарата переміщується доти, поки на екрані (у вигляді матового скла), що міститься коло задньої стінки камери, не буде зображення предмета. Переміщення виконується з допомогою гвинтів і можливе тому, що бокові



стілки апарата зроблені в формі гармонії з непроникної для світла матерії. Коли наводка закінчена, матове скло виймається і в точності на його місце вставляється касета — плоский ящикок, непроникний для світла, що містить у собі світлочутливу пластинку. Передня стінка касети, звернена до об'єктива, відкривається тільки тоді, коли об'єктив закрито ковпаком або ширмою. Саме зйомання полягає в тому, що ковпак з об'єктива знімається або ширма механічно відсовується на деякий час, залежно від величини освітлення, і на пластинці виходить світлове зображення предмета. По закінченні зйомання передня стінка касети закривається.



Рис. 240. Негатив - позитив.

**175. Одержання знімка.** Світлочутлива пластинка виготовляється так: розчиняють желатину і калій - бромід або амоній - бромід у воді і додають (при червоному світлі) срібло - нітрату; при цьому утворюється срібло - бромід, який розподіляється в желатині в дуже подрібненому стані у вигляді емульсії. Потім для збільшення світлочутливості емульсію нагрівають. Застиглу після охолодження емульсію подрібнюють, промивають для видалення слідів розчинних солей, розтоплюють і поливають нею скляні пластинки.

**Проявлення.** Після зйомання світлочутлива пластинка виймається з касети в темноті або при червоному освітленні і занурюється в ванну з так званім проявником (проявники мають різний хімічний склад). В проявнику виділяється найдрібніший порошок металічного срібла тільки на тих місцях пластинки, які піддавались освітленню, і при тому ступіні густоти виділення відповідає мірі освітленості.

Як проявник великого поширення набув метол - гідрохінон. Один із найживаніших рецептів метол - гідрохінону такий: 1 л води, 5 г метолу, 7 г гідрохінону, 100 г сульфату, 100 г поташу, 2,5 г калій - броміду. Взята для проявлення порція розбавляється три - або чотирикратною кількістю води.

**Закріплення.** Щоб усунути всі сліди срібла на неосвітлених місцях, бо інакше при винесенні на світло і вони зазнали б хімічного впливу світла, пластинка з проявника переноситься в другу ванну з закріплювачем (фіксаж), звичайно з натрій - тіосульфатом — гіпосульфитом, який дає з срібло - бромідом легкорозчинну сполуку, вимивану із шару при промиванні його водою.

З закріплювача пластинка виходить з темними шарами срібла на освітлених частинах предмета і прозорою — на неосвітлених. Коротше кажучи, світлі частини предмета зображаються темними, темні — світлими. Через таку протилежність предметів одержаний знімок називається негативом (рис. 240).

**Промивання.** Після фіксування пластинку старанно промивають, щоб змити всі сліди проявника і фіксажу та утворених солей. Після промивання пластинку висушується, і негатив готовий.

**Друкування.** Для одержання відбитків з негатива до нього притискається світлочутливим шаром папір і виставляється на деякий час на світло. Світлочутливий папір готується так само, як і пластинка. Обробляється він однаково з пластинкою. Через те що відбиток на папері протилежний щодо розподілу світла й тіні негативу, то він однаковий щодо цього з предметом і називається позитивом.

Позитиви, виготовлені на скляній пластинці і призначені для проєкційного ліхтаря, називаються діапозитивами.

### *Культурне значення фотографії.*

Крім відбивання облич і збереження їх у пам'яті наступних поколінь, фотографія має велике значення. Рідкі явища природи або непередбачені випадки можна відбити фотографічно. Так, фотографія застосовується постійно при спостереженнях над Сонцем під час сонячних затемнень, що тривають протягом кількох хвилин. Зниключі пам'ятки старовини або предмети, що руйнуються, можуть бути назавжди збережені для вивчення у фотографічних знімках.

Льотчики, що пролітають великі простори, позбавлені можливості робити вимірювання на тих місцевостях, над якими вони пролітають, але знімки, які вони роблять, дають змогу потім провести всі необхідні обчислення. Фотографія може дати зображення предметів, невидимих оком через малу їх яскравість. Фотографічний апарат, що прилучений до астрономічної труби

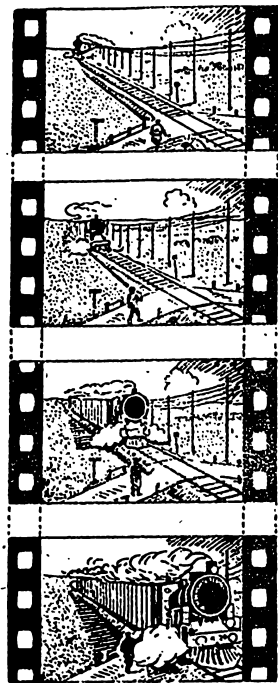


Рис. 241. Зразок фільму.  
(кадри вибрано з проміжками).

і разом з нею обертається відповідно до добового руху Землі протягом усієї ночі, може доставати довгий час енергію на одне й те ж місце від якогонебудь слабого світила і дати його відбиток, хоч би воно само й лишалось невидимим для ока. Взагалі багато з того, що відокремлене простором і часом, можна зафіксувати фотографічним знімком, розмножити і зробити здобутком мас в першому-ліпшому місці Землі.

**176. Кінематограф.** Кінематограф є проєкційний апарат, в якому діапозитивом служить рухома целулоїдна стрічка, на якій відбиті фотографічні знімки (рис. 241). На прозорій целулоїдній

стрічки робляться фотографічні знімки з якихнебудь рухомих тіл у кількості 24 на секунду. Коли ця стрічка вставляється в апарат і приводиться в рух мотором з тією ж швидкістю 24 кадрів на секунду, то на екрані появляються зображення, в проміжки між якими світло закривається. Через те що око зберігає враження до 0,1 сек., то ми бачимо зображення ще й тоді, коли його вже немає на екрані; тому всі зображення зливаються в одну цілу картину і перед глядачем відтворюється рух. В цьому перевага кінематографічного знімка перед звичайною фотографією. Тепер винайшли спосіб записувати не тільки зображення, а й звуки (звукове кіно).

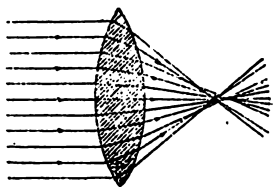


Рис. 242. Сферична аберація.

177. Сферична аберація. Сферична лінза збирає в одній точці тільки вузький пучок променів, що падають уздовж оптичної осі. Чим далі промінь падає від осі, тим ближче до лінзи він перетинає вісь після заломлення (рис. 242). Перетин заломлених лінзою променів у різних точках називається сферичною аберацією<sup>1</sup>.

При паданні широкого пучка променів аберація робить зображення розпливчастим. Коли потрібна різкість зображення, хоч би за рахунок зменшення яскравості його, перед об'єктивом ставлять діафрагму — непрозорий екран з круглим отвором посередині, що виділяє пучок променів бажаного діаметра.

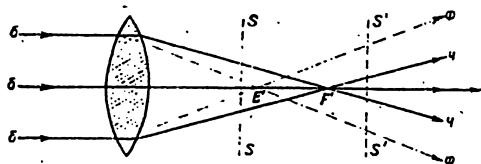


Рис. 243. Хроматична аберація.

178. Хроматична аберація. При проходженні білого світла через лінзу фіолетове проміння заломлюється сильніше всіх і збирається в точці найближче до лінзи; червоне — слабше всіх

і збирається в точці найдалі від лінзи; інші кольорові промені збираються по порядку між цими точками (рис. 243). Це явище називається хроматичною аберацією. Результатом хроматичної аберації є те, що краї зображення в лінзі дістають радувне забарвлення. Справді, якщо поставити екран до скла ближче фіолетового фокуса, то, як видно з рисунка, всі промені, крім зовнішніх червоних, змішуватимуться на екрані, даючи біле світло, червоні ж дадуть зовнішнє червоне забарвлення; якщо ж

<sup>1</sup> Сферична аберація відбувається і в угнутому сферичному дзеркалі: крайові промені, паралельні головній осі, після відбивання від нього перетинають головну оптичну вісь у точках, що лежать далі головного фокуса.

<sup>2</sup> З початкового курсу фізики відомо, що біле світло складається з багатьох кольорових променів, при чому лінза для променів різної кольорності має різні показники заломлення.

відсунути екран за червоний фокус, то дадуть забарвлення зовнішні фіолетові промені. Хроматична аберация є великим дефектом зображення. Її можна усунути відповідним добором кількох опуклих і вгнутих лінз з сортів скла з різними показниками заломлення. Тому об'єктиви і окуляри сучасних оптичних приладів являють собою дуже складні системи багатьох лінз (рис. 244).

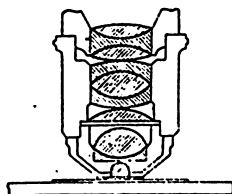


Рис. 244. Складний об'єктив мікроскопа.

### ЗАПИТАННЯ.

1. Що називається сферичним дзеркалом?
2. Що називається головною оптичною віссю дзеркала?
3. Що називається головним фокусом сферичного дзеркала?
4. Які зображення дає вгнуте сферичне дзеркало?
5. Яке зображення дає опукле сферичне дзеркало?
6. Що називається спряженими точками сферичного дзеркала?
7. Яка формула сферичного дзеркала?
8. Що називається опуклою лінзою? вгнутою?
9. Що називається головною оптичною віссю лінзи?
10. Що називається оптичним центром лінзи?
11. Що називається побічною віссю лінзи?
12. Що називається головним фокусом опуклої лінзи? вгнутої?
13. Що називається головною фокусною віддаллю?
14. Що називається спряженими точками лінзи?
15. Яка формула опуклої лінзи? вгнутої?
16. Скільки треба променів для побудови зображення світної точки в лінзі?
17. Якими променями найпростіше побудувати зображення точки?
18. Побудувати зображення в опуклій лінзі і визначити якість зображення для випадків  $s > 2f$ ;  $s = 2f$ ;  $f < s < 2f$ ;  $s = f$ ;  $s < f$ .
19. Оцінити збільшення для всіх випадків попереднього питання.
20. Простежити переміщення зображення і зміни його розміру при зміні віддалі предмета від  $s = \infty$  до  $s = 0$ .
21. Якими способами можна виміряти головну фокусну віддаль опуклої лінзи?
22. Чим вимірюється оптична сила лінзи?
23. Що таке діоптрія?

179. **Око як оптичний апарат.** Для сприймання світла в тваринному організмі є спеціальний орган — око. Рисунок 245 зображає головні частини людського око.

Саме тіло ока має таку будову.

Зовнішня оболонка ока — хрящоподібний склеротик *H*; передня частина її опукла і прозора — рогова оболонка *A*. Внутрішня оболонка, в якій розгалужуються кровоносні судини, що живлять око, — судинна оболонка *J*, передня частина її (різного кольору) у

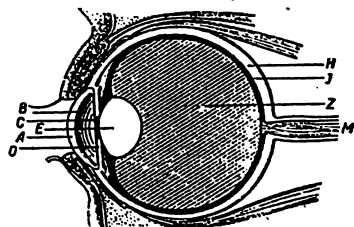


Рис. 245. Розріз у горизонтальній площині очного яблука.

різних людей) — радужна оболонка  $D$ ; в радужній оболонці отвір — зіниця  $C$ .

За радужною оболонкою — двоопукла лінза — кришталік  $E$ ; він оточений м'язом, який його підтримує і може стискати.

Простір між роговою і радужною оболонками заповнений водянистою вологою  $B$ , а за кришталіком — прозорим скловидним тілом  $Z$ .

Ззаду, через оболонки входить зоровий нерв  $M$ , що сполучає око з мозком. Зоровий нерв, розгалужуючись, вистилає всю задню частину ока і утворює сітківку, або ретину. Місце входу нерва нечутливе до світла і називається сліпою плямою. На деякій віддалі від сліпої плями в сторону виска лежить найчутливіша частина ретини — *жовта пляма*.

Передній головний фокус ока лежить на 13,75 мм від рогової оболонки<sup>1</sup>.

Для всякого ока можна обчисленням знайти таку лінзу, яка буде так само заломлювати промені, як і дане око в нормальному стані.

Обчислена таким способом лінза називається приведеним оком. Оптичний центр приведенного ока є оптичним центром ока.

Оптичний центр лежить всередині кришталіка при самій задній поверхні його. Пряма, що проходить через оптичний центр ока і середину жовтої плями, називається оптичною віссю ока, або очною віссю. При такій довжині фокусної віддалі предмет завжди знаходиться за подвійною фокусною віддаллю, і два опуклих заломних середовища — *водяниста волога* і, роговним чинком, *кришталік* — *перетворюють промені, що розходяться від предмета, в збіжні і дають дійсне обернене зменшене зображення предмета, яке лежить між внутрішнім головним фокусом і точкою на подвійній фокусній віддалі. Виразне бачення предмета відбувається тоді, коли зображення предмета падає на сітчасту оболонку (ретину) ока.*

При розборі властивостей лінз було зазначено, що при переміщенні предмета від безконечності до подвійної фокусної віддалі зображення переміщується від фокуса до подвійної фокусної віддалі. Проте, для виразного бачення предмета необхідно, щоб зображення предмета завжди попадало на одне і те ж місце ока — сітчасту оболонку, незалежно від віддалі предмета. Така постійність у положенні зображення досягається зміною самої оптичної системи, зміною кривини сферичних поверхонь і в наслідок цього зміною фокусної віддалі. Якщо предмет в якомунебудь положенні дає зображення на сітчастій оболонці, то при наближенні його до ока при незмінності оптичної системи його зображення повинно було б піти за око всередину голови ближче до точки на подвійній фокус-

<sup>1</sup> Показник заломлення рогової оболонки, водянистої і скловидної вологи для середньої частини спектра дорівнює (див. § 203) 1,336. Показник заломлення кришталіка дорівнює 1,437 в середньому (кришталік складається з різномірних шарів).

ній віддалі. Щоб вернути його на попереднє місце, треба кінець подвійної фокусної віддалі наблизити до ретини; для цього треба зменшити головну фокусну віддаль, а це зменшення досягається збільшенням опуклості кришталіка. Збільшення ж опуклості кришталіка здійснюється напруженням очного мускула. Поки мускул не діє, кришталік має найменш опуклу форму; при всякому напруженні мускула кінці його, що вдержують кришталік, зближаються: кришталік зменшується в напрямі, перпендикулярному до очної осі, але потовщується посередині, стає більш опуклим, і його головна фокусна віддаль зменшується. При переміщенні предмета відбувається така незалежна від свідомості зміна напруження мускула і, отже, така зміна кривини кришталіка, що зображення предмета незмінно попадає на сітчасту оболонку.

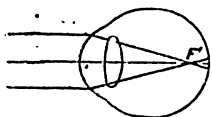


Рис. 246. Короткозоре око.

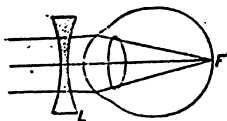


Рис. 247. Короткозоре око з окулярами.

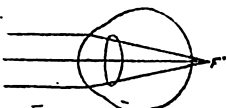


Рис. 248. Далекозоре око.

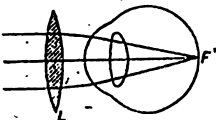


Рис. 249. Далекозоре око з окулярами.

*Здатність ока змінювати кривину кришталіка в такій мірі, щоб зображення предмета завжди попадало на сітчасту оболонку, називається акомодациєю.* Отже, одержання на ретині різкого зображення від предметів, які знаходяться на різних віддаль, можливе завдяки акомодациї, або пристосуванню ока до віддалі.

Пристосування ока до віддалі не безмежне. Для кожного ока є далека точка, тобто така віддаль, на якій око бачить предмет при спокійному стані мускула, і близька точка — віддаль, на якій око бачить предмет при найбільшому напруженні мускула. Крім того, розрізняють ще віддаль найкращого зору, тобто таку віддаль предмета від ока, на якій око бачить найбільші подробиці при найменшому стомленні мускула. Залежно від величини цих віддалей очі поділяються на три основні групи: нормальне, короткозоре і далекозоре.

180. **Короткозорість і далекозорість.** Око називається нормальним, якщо при спокійному стані мускула людина бачить безконечно-віддалені предмети. Для неї далека точка лежить у безконечності. При розгляданні предмета, що наближається з безконечності до ока, мускул повинен напружуватися в тій чи іншій мірі, щоб предмет лишився видимим: близька точка в юнацькі роки лежить на віддалі 10 см. Віддаль найкращого зору для цих років дорівнює 25 см.

Короткозорим називається таке око, в якому головний фокус при спокійному стані мускула лежить всередині очного яблука (рис. 246). Таке око не може виразно бачити дуже від-

далі предмети. Для нього далека точка лежить в певній віддалі впереду від ока. Далеким називається таке око, в якому головний фокус при спокійному стані мускула лежить позаду сітчастої оболонки. Для нього далека точка лежить в певній віддалі позаду ока.

далені предмети, бо при напруженні мускула головний фокус наближається до кристаліка, а не до ретини. Далека точка короткозорого ока лежить не в безконечності, а на деякій віддалі. Віддаль найкращого зору і близька точка для короткозорого ока ближчі, ніж для нормального (залежно від міри короткозорості). Фокус паралельних променів у короткозорому оці виходить ближче ретини. Щоб для нього дістати фокус паралельних променів на ретині при спокійному стані мускула, треба прилучити до нього розсівну вгнуту лінзу відповідної кривини (окуляри) (рис. 247).

Далекозорим називається таке око, в якому головний фокус при спокійному стані мускула лежить за очним яблуком (рис. 248). Далекої точки для такого ока не існує. Близька точка — близько 30 см; віддаль найкращого зору більша нормального. Далекозоре око заломлює слабше нормального. Щоб для нього одержати фокус паралельних променів на ретині при спокійному стані мускула, треба прилучити до нього збірну опуклу лінзу відповідної кривини (окуляри) (рис. 249).

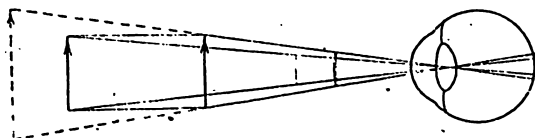


Рис. 250. До поняття про кут зору.

**181. Умови виразного бачення. Кут зору.** При розгляданні предмета мускули так повертають око, щоб на розглядану точку попадала очна вісь. Якщо предмет великий, то його розглядають по окремих точках, на які переводиться очна вісь. Це робиться тому, що жовта пляма, через середину якої проходить очна вісь, — є найчутливіше до світла місце ока. Тому першою умовою виразного бачення є *одержання зображення на жовтій плямі*. Різна чутливість різних частин сітківки до світла залежить від відмінності анатомічної будови їх.

Сприймання оком світла зв'язане з хімічними явищами, що відбуваються з речовиною сітківки; ця речовина розкладається при освітленні, а в моменти перерви освітлення, в темноті, відновлюється від живлення кров'ю. Тому другою умовою бачення повинна бути така *міра освітлення сітківки*, яка була б не нижча межі, необхідної для збудження хімічного явища.

Нарешті, третя умова виразного бачення полягає в тому, *щоб кут зору предмета був не менше граничного кута* (рис. 250). *Кутом зору називається кут між двома прямими, проведеними від оптичного центра ока до кінців предмета*. Дві точки предмета лишаються роздільно видимими тоді, коли віддаль їх зображень у жовтій плямі не менша як 0,002 мм. В протилежному разі вони зливаються в одну.

Цей граничний віддалі відповідає кут в  $26''$  (близько  $\frac{1}{2}''$ ), який і є граничним кутом зору. Це — кут, під яким видно відрізок в  $1\text{ см}$  на віддалі  $77\text{ м}$  від ока:



Рис. 251. Зір обома очима.

Кут зору збільшується при наближенні предмета до ока, але границею цього наближення є близька точка: вона найближче у короткозорих, через що короткозорі краще від інших можуть розглядати дрібний друк, рисунки та інші дрібні предмети. Але людина з допомогою оптичних приладів навчилася збільшувати кут зору при розгляданні або дуже малих, або надзвичайно віддалених предметів. Мікроскоп (§ 191) і телескоп (§ 192) служать для збільшення кута зору.

Якщо найбільш виразне бачення припадає на те поле предметів, зображення яких падає на жовту пляму, то, беручи до уваги зір з допомогою всіх інших частин сітківки, слід відзначити, що все поле зору ока трохи менше двох прямих кутів (близько  $160^\circ$ ).

**182. Зір обома очима.** При розгляданні кожного предмета виходить по зображенню в кожному зважаючи на пару зображень, ми бачимо один предмет, але тільки тоді, коли обидва зображення припадають на відповідні точки (щодо осі) тієї й другої ретини. Предмети ж, зображення яких попадають не на відповідні точки ретини, двояться.

У цьому легко перекопатися, помістивши два олівці: один — близько до очей, другий — подалі. Якщо дивитися, не зводячи очей, на перший, другий здається подвійним; якщо ж пильно дивитися на другий, — двоїться перший (рис. 251).

При розгляданні всякого предмета, що займає якийнебудь об'єм простору, в обох очах виходять зображення, трохи відмінні одне від одного. Найпростіше в цьому перекопатися, якщо, закривши одне око, поставити перед другим два пальці так, щоб передній закривав задній. Якщо, не міняючи положення голови і пальців, розплющити перше око і заплющити друге, то пальці уже не буде видно на одній прямій. При всякому розгляданні групи розміщених у глибину предметів по черзі то одним, то другим оком легко відмітити відмінність в їх відносному положенні.

Просторове, рельєфне сприймання предметів можливе тільки тоді, коли в обох очах створюються різні зображення предметів. Якщо зробити два фотографічних знімки так, що один знімок дає зображення предмета в тому вигляді, як він сприймається правим оком, другий так, як він сприймається лівим, і розглядати обидва знімки через при-

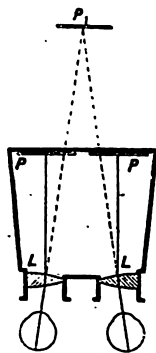


Рис. 252. Схема будови стереоскопа.



лад стереоскоп, що зводить обидва зображення в одне (рис. 252), то плоскі знімки здаватимуться рельєфними.

Навпаки, коли в очах зображення предметів стають однаковими, то просторово розміщені предмети починають здаватися плоскими. За межами понад половину кілометра ми бачимо місцевість як плоску картину без глибини. Така властивість ока надзвичайно утруднює оцінку відносної віддалі предметів вдалині і, особливо в боях, перешкоджає правильності прицілу, але світлотехніка усуває ці дефекти винайденням відповідних приладів.

**183. Судження про величину і віддаленість предметів.** Судження про величину і віддаленість предметів ґрунтується на одержуваних від них зображеннях і на тому м'язовому почутті, яке супроводить всяку роботу мускулів по переміщенню очного яблука або по зміні кривини кришталика. Ступінь правильності цього судження підвищується поступово, з набуванням досвіду.

Якщо предмети знаходяться на однаковій віддалі, то про їх відносну величину ми судимо на підставі того м'язового почуття, яке супроводить переміщення очної осі на різні точки того чи іншого предмета. Якщо два однакових предмети знаходяться на різних віддальях, то судження ґрунтується на м'язовому почутті, яке супроводить акомодацию.

При розгляданні різних предметів на різних віддальях велике значення має саме зір обома очима: при переводі ока з близького на більш віддалений предмет доводиться по-різному переміщати очні яблука, щоб очні осі весь час перетиналися в одній точці. Відмінність м'язового почуття при цих переміщеннях лежить в основі досвідного судження про розмір і віддаль предмета.

**184. Тривалість зорового враження.** Збуджене зорове враження зберігається в даному місці сітківки і після того, як з нього зійшло зображення джерела враження. При середній освітленості тривалість зорового враження тягнеться близько 0,1 сек., при більшій може доходити до 1 сек. Ця властивість виявляється в численних повсякденних явищах: розжарена вуглинка, що швидко рухається в темноті, залишає за собою світлу лінію; спиці велосипедного колеса, що швидко обертаються, зливаються в суцільну поверхню; після глядіння на розжарений волосок лампочки світлове враження зберігається і після закриття повік або переведення ока на темну поверхню.

**185. Стомлення ока.** Якщо на одному й тому місці сітківки довгий час виходить зображення предмета, то чутливість цього місця зменшується; при переведенні ока на слабше освітлену поверхню, наприклад, на білу стіну, на освітлення реагують інші частини сітківки, крім стомленої, і оку видно на білому фоні темне зображення того ж предмета. Так, після глядіння на електричну лампочку можна бачити на білій стіні її темне зображення.

**186. Сприймання кольорів.** За теорією Гельмгольца, в оці є три роди закінчень нервів, що реагують: один рід — тільки на червоні промені; другий — тільки на зелені; третій — тільки на фіолетові. Поки попадає в око тільки один із перелічених вище кольорів, то він і приводить у дію відповідні закінчення. Якщо ж попадає якийсьбудь проміжний промінь, то він приводить у дію закінчення нервів, які реагують на обидва основні сусідні промені, при тому в різній мірі. Так всі кольори, що лежать у спектрі між червоним і зеленим, збуджують ті органи, які реагують на червоне й зелене, тільки в кожному випадку в різній мірі. При попаданні в око складних кольорових променів реагують одночасно в різних ступенях всі три роди нервів.

187. Чутливість ока до різних кольорів. Око не має однакової чутливості до всіх променів спектра. Найбільша чутливість припадає на жовто-зелені промені; чутливість до крайніх променів спектра в 1000 раз менша. Тому об'єктивне (приладом) вимірювання розподілу енергії в спектрі<sup>1</sup> відрізняється від суб'єктивного його сприйняття (оком).

Розподіл світлих і темних частин, а також міра їх інтенсивності на фотографічному знімку відрізняються від розподілу і міри інтенсивності на самому предметі при розгляданні оком. Бо фотографічна пластинка найчутливіша до синіх і фіолетових кольорів; оку ж здається найяскравішою середня частина спектра.

188. Колірне стомлення. При діянні на сітчасту оболонку якихнебудь окремих кольорів вона стає менш чутливою до цих кольорів — настає колірне стомлення. Якщо око, стомлене колірним враженням, перевести на слабше освітлену білу поверхню, то стомлені частини сітківки не реагуватимуть на ті кольорові промені, що входять до складу білого кольору, які спричинили стомлення, а будуть реагувати на сукупність усіх інших кольорових променів; виходить зображення того ж кольорового предмета, тільки забарвленого в додатковий колір.



Рис. 253. Іррадіація.

189. Іррадіація. При розгляданні яскраво освітленого предмета на чорному фоні він здається завжди більшим, ніж його геометричні розміри; так, серп молодого Місяця, освітлена „попелястим“ світлом; волосок горячої лампочки — товщий, ніж нерозжареної; білий квадрат на чорному фоні — більший, ніж такий же чорний на білому (рис. 253). Збільшення розмірів світлих предметів за рахунок темного фону називається іррадіацією. Вона пояснюється тим, що подразнення сітчастої оболонки, спричинене зображенням предмета, фізіологічно поширюється на сусідні частини її за геометричне зображення, і предмет здається більшим.

190. Призначення оптичних приладів. Якби людина користувалася безпосередньо тільки своїми очима, то коло предметів, доступних розгляданню, було б дуже обмежене: всі малі предмети і всі віддалені, для яких кут зору менший граничного, залишалися б недоступними для розглядання.

Але людина зуміла, користуючись заломними властивостями лінз і відбивними властивостями поверхонь, побудувати прилади, так звані оптичні, призначення яких полягає в збільшенні кута зору і, отже, в розширенні кола предметів, доступних баченню і вивченню людини.

Той оптичний прилад, який призначається для розглядання близьких, але надзвичайно малих предметів, називається мікроскопом; той же прилад, який призначається для розглядання хоча й великих, але настільки віддалених предметів, що їх кут зору все ж дуже малий, називається телескопом<sup>2</sup>.

Найпростішим з мікроскопів є звичайна двоопукла лінза. Коли предмет ставить ближче фокуса, то, як відомо, виходить уявне збільшене зображення. При такому користуванні лінза стає назву лупи.

<sup>1</sup> Див. § 210.

<sup>2</sup> По-грецькому σκοπεο значить дивлюсь, мікрос — малий, теле — далеко.

Якщо лупа ставиться перед предметом так, щоб уявне зображення вийшло на віддалі найкращого зору, тобто для нормального ока на  $s' = 25$  см, то збільшення лупи дорівнює  $\frac{25}{f}$ .

Складний мікроскоп складається принаймні з двох лінз.

191. Мікроскоп. Оптична система мікроскопа (рис. 254) складається з двох лінз: однієї, що обернена до розгляданого предмета і називається об'єктивом, і другої, що міститься з боку ока і називається окуляром.

Обидві лінзи вставлені в металічну трубу — тубус.

Об'єктив — короткофокусна лінза, окуляр — довгофокусна.

Об'єктив повинен дати дійсне збільшене зображення предмета, тому предмет поміщається від об'єктива трохи далі фокусної віддалі. Зображення буде за правилом § 170 (рис. 255). Це перше зображення є предметом для окуляра. Щоб дістати знову збільшене зображення, окуляр поміщається на такій віддалі, щоб зображення  $A_1B_1$  лежало між окуляром і його головним фокусом. Проводячи від кожної точки  $A_1$  і  $B_1$  по два промені (з числа зазначених у § 168), можна побудувати за тими ж

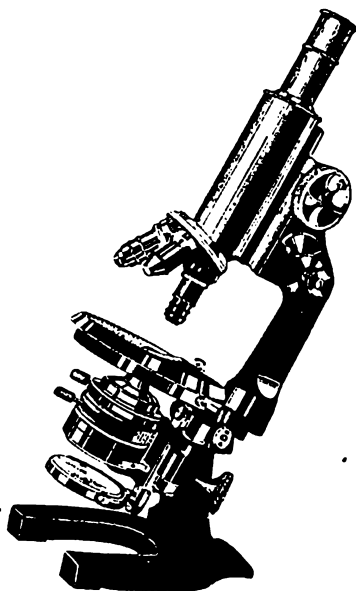


Рис. 254. Мікроскоп.

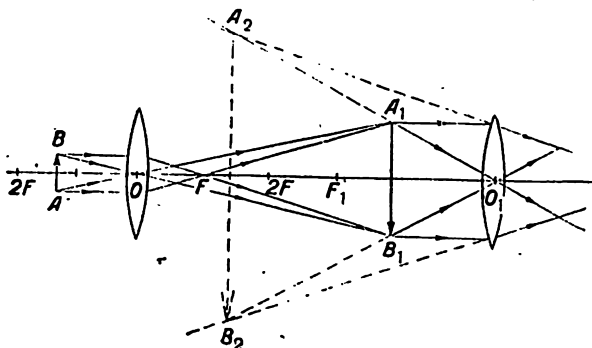


Рис. 255. Хід променів у мікроскопі.

правилами друге зображення  $A_2B_2$ . Воно буде уявне, обернене щодо предмета і збільшене. Тубус гвинтом переміщують доти, поки уявне зображення не буде на віддалі найкращого зору від ока, отже, для нормального ока — на віддалі 25 см. Збільшення мікроскопа можна довести до 3000 раз.

Якщо направити збоку на розгляданий предмет дуже сильний пучок світла, то промені, відбиваючись від найдрібніших частинок, можуть попадати в об'єктив мікроскопа і дадуть змогу виявити присутність цих частинок.

Так само стають видимими у боковому напрямі найдрібніші порошки, що носяться в кімнаті, при освітленні їх сонячним променем. З їх освітленості можна судити про розміри частинок, що відбивають світло. Таким способом можна виявити наявність і визначити розмір частинок з діаметром до 0,000005 м.м, але форму й будову їх не можна розрізнити. Прилад, що так діє, називається ультрамікроскопом (винайдений Зідентоффом і Зігмонді).

192. Телескоп. Телескопи, в яких збільшення досягається сферичними лінзами, називаються рефракторами. Одним із перших рефракторів була астрономічна труба, сконструйована Кеплером в 1611 р.

Труба Кеплера складається так само, як і мікроскоп, з двох опуклих лінз — об'єктива й окуляра (рис. 256).

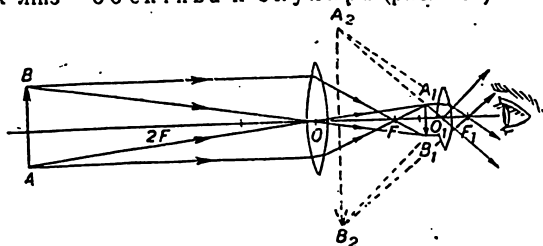


Рис. 256. Хід променів у трубі Кеплера.

Об'єктив труби — довгофокусний, окуляр — короткофокусний. Промені, що йдуть від кожної точки предмета, можна взяти за паралельні. Нехай від верхньої точки предмета іде промінь  $B$ . Після заломлення в об'єктиві він піде через фокус, що лежить на побічній осі майже на головній фокусній віддалі. Від нижньої точки предмета іде промінь  $A$ . Після заломлення в об'єктиві він пройде через фокус на своїй побічній оптичній осі, що лежить також майже на головній фокусній віддалі. Отже, коло самого головного фокуса (за ним) об'єктива виходить дійсне, сильно зменшене, обернене зображення предмета. Це дійсне зображення розглядається через окуляр, який поміщається на такій віддалі, щоб перше зображення  $A_1B_1$  лежало між ним і його головним фокусом, а утворене окуляром уявне зображення  $A_2B_2$  знаходилося б від ока на віддалі найкращого зору.

За допомогою телескопа предмет розглядається під кутом зору  $A_2O_1B_2$ , тоді як для неозброєного ока<sup>1</sup> кутом зору є кут

<sup>1</sup> Зважаючи на далеку віддаль розмір труби можна до уваги не брати і вважати, що око знаходиться в точці  $O$ .

АОВ. Залежно від фокусної віддалі лінз телескопа збільшення кута зору відповідає приближенню розгляданих тіл в 1000 і більше (до 10000) раз.

Завдяки цьому на Місяці, Сонці і планетах вивчені такі деталі, які без телескопа залишалися б зовсім невідомими. Внаслідок величезної віддалі зір вони в телескопі лишаються точками, але яскравість їх дуже зростає, бо в одну точку збираються промені, що падають на всю поверхню об'єктива телескопа.

Завдяки збільшенню яскравості через телескоп можна бачити сотні мільйонів зір, тоді як неозброєне око розрізняє їх близько 5000. Телескопи дають можливість поділити на частини так звані зоряні скупчення; вони уловлюють слабе світло туманностей. У сполученні з спектроскопом і фотографічним апаратом телескопи дають нам всі різноманітні відомості про будову всесвіту, розсуваючи до дуже віддалених меж видимий світ і збагачуючи наукову думку.

Рисунок 257 дає зображення одного з сучасних рефракторів<sup>1</sup>.

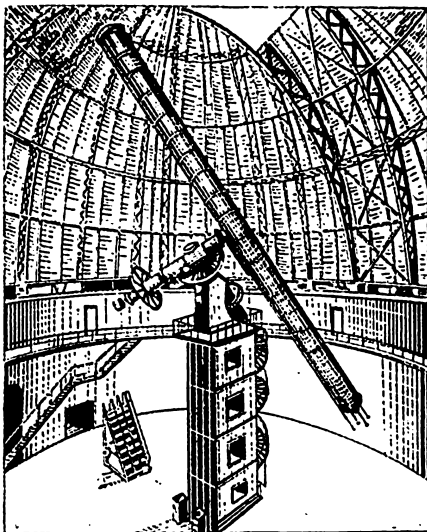


Рис. 257. Рефрактор.

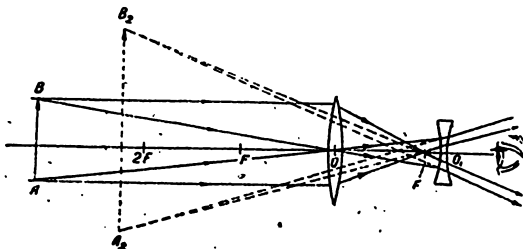


Рис. 258. Хід променів у трубі Галілея.

А У відміну від рефрактора, телескоп, в якому перше зображення утворюється з допомогою сферичних дзеркал, називається рефлектором.

Трохи раніше Кеплера, в 1609 р., Галілей винайшов свою трубу. В ній окуляр складається з угнутої лінзи; хід променів зображено на рисунку 258. Зображення виходить прямим щодо предмета; в цьому полягає її перевага перед трубою Кеплера

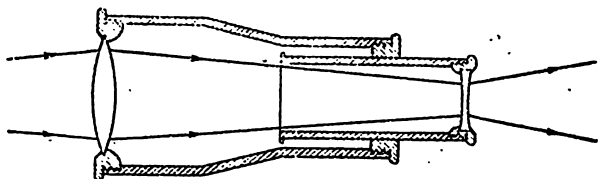


Рис. 259. Розріз театрального бінокля.

при розгляданні земних предметів, які незручно спостерігати в перевернутому вигляді.

Сполучення разом двох галілейових труб, що дає можливість одночасно розглядати предмет двома очима, називається біноклем. Рисунок 259 зображає розріз труби звичайного театрального бінокля.

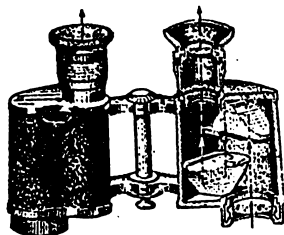


Рис. 260. Призмовий бінокль.

В нашому столітті ввійшли у вжиток так звані призмові біноклі, в яких перетворення зображення в праме робиться через многократне повне внутрішнє відбивання в призмах. Рисунок 260 дає зовнішній вигляд бінокля, схему будови і хід променя.

Перевага призмового бінокля — ширше поле зору порівняно з галілейовим біноклем і менший розмір при тому ж збільшенні, ніж у галілейового бінокля. Завдяки цим своїм перевагам призмові біноклі набули широкого застосування у військовій справі як польові біноклі.

### ЗАПИТАННЯ.

1. Описати головні частини ока.
2. Які частини ока переважно впливають на хід променів?
3. Що являє собою кришталик? Як він удержується в оці? Від чого і як змінюється форма кришталика?
4. Що таке ретина?
5. Що таке сліпа пляма?
6. Що таке жовта пляма? Яке її положення і значення?
7. Які зображення утворюються в оці при баченні?
8. Що таке акомодация? Як вона відбувається?
9. Що таке далека точка? близька?
10. Що називається віддаллю найкращого зору?
11. Що називається кутом зору?
12. Який граничний кут зору? Від чого він залежить?
13. Які три умови виразного бачення?
14. Чи однакові зображення тіла утворюються в темі і другому оці?
15. При якій умові при зорі обома очима видно один предмет?

16. Яке основне призначення мікроскопа і телескопа ?
17. Яка лінза оптичного прилада називається об'єктивом ?
18. Яка лінза оптичного прилада називається окуляром ?
19. Описати будову і хід променів у мікроскопі.
20. Описати будову і хід променів у трубі Кеплера.
21. Описати будову і застосування труби Галілея.

## II. ПРИРОДА СВІТЛА.

193. **Інтерференція світла.** Запаліть газовий або спиртовий пальник і вмістіть у його полум'я кусочок азбесту, змоченого в розчині кухонної солі, щоб добути однорідний жовтий колір.

Візьміть дві скляні пластинки (достатній розмір—60 мм×30 мм×2 мм), дуже сильно здушіть їх пальцями і спостерігайте відбите від них зображення жовтого полум'я. Ви побачите чергування жовтих і темних смуг (рис. 261). Виходить несподівана картина: світло, відбите від двох скляних пластин, дає і освітлення і затемнення: *світло гаситься світлом*.

Це явище нагадує гасіння звуку звуком у спробах з інтерференцією звуку.

Гасіння світла світлом також є наслідком інтерференції світла.

Інтерференція може відбуватися тільки при накладанні хвиль.

Отже, описана проста спроба з інтерференцією світла є доказом того, що *причиною світла є хвилеподібний рух*.

Крім описаної спроби, інтерференцію світла можна мати так. Якщо до плоскої пластинки дзеркального скла прикласти опуклу лінзу з дуже великим радіусом (з малою кривиною) і освітити дуговим ліхтарем, закритим червоним або якимнебудь іншим кольоровим склом, то при проєктуванні на екран світлом, що проходить, можна спостерігати в центрі зображення кольорову

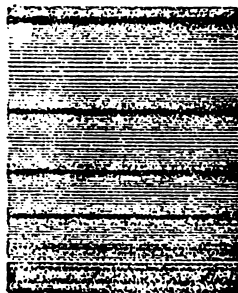


Рис. 261. Інтерференційні смуги при освітленні однорідним світлом мильної плівки.

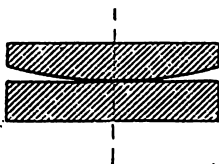


Рис. 262. Прилад для одержання кільця Ньютона.

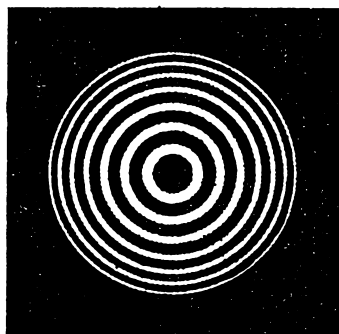


Рис. 263. Інтерференційні кільця Ньютона у відбитому світлі.

пляму, оточену почерезними темними й кольоровими кільцями (так звані кільця Ньютона) (рис. 262 — 263)

У відбитому світлі в центрі утворюється темний круг, за яким розміщуються кольорові і темні кільця.

Якщо замінити червоне скло зеленим, потім фіолетовим, то можна спостерігати, що ширина кольорових і темних смуг в зеленому світлі менша, ніж у червоному, в фіолетовому — менша, ніж у зеленому. З цієї спроби можна зробити висновок, що спектральні кольори спричиняються хвилями, які чимсь відрізняються одна від одної. Ця різниця полягає, як це впливатиме з дальшого викладу, в різниці довжин хвиль.

Легко передбачити, що при освітленні прилада білим світлом можна спостерігати сукупність кілець усіх спектральних кольорів, що і підтверджується спробою.

Інтерференційні спектральні смуги можна також спостерігати при освітленні білим світлом найтонших плівок гасу або масла, що розплилися по поверхні води, або на мильних плівках (мильна піна, мильні бульбашки).

194. Світлова хвиля. Промінь. Інтерференція світла твердо встановлює хвилеподібний характер тих змін, які спричиняють світлові явища. Світло поширюється цілком вільно у міжпланетному просторі, в якому немає речовини, що входить до складу вичуваних фізикою і хімією тіл, а також вільно поширюється через внутрішні порожнини скляних трубок, з яких викачано повітря з якнайвищою мірою розрідження. Тому хвильова теорія світла приписує проходження світлових явищ хвилеподібним змінам в особливому середовищі, що заповнює всі проміжки між тілами і їх найдрібнішими частинками і називається ефіром.

Це — той самий ефір, в якому поширюються електричне і магнітне поля.

Інших властивостей ефіру, крім тієї, що він є носієм електромагнітних і світлових явищ і поля тяжіння, покищо не знають.

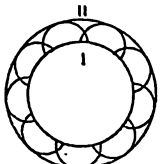


Рис. 264. Обвідна елементарних хвиль (за принципом Гюйгенса) в перерізі.

Хвильова теорія світла вчить, що навколо всякого точкового джерела світла, наприклад, навколо малої вольтової дуги, маленького водоска жарової лампи, в ефірі поширюються сферичні (кулясті) хвилі (рис. 264). Кожна сферична поверхня містить точки ефіру, які знаходяться в одній фазі коливання. Віддалі по радіусу двох concentричних сферичних поверхонь, що проходять через дві послідовні однакові фази, називається довжиною хвилі. Перпендикуляр до поверхні сфери (нормаль) називається променем<sup>1</sup>. Якщо джерело світла знаходиться від місця спостереження на дуже великій віддалі, то спостережувана частина сферичної хвилі незмірно мало відрізняється від площини, і тоді хвиля називається плоскою. У випадку плоскої хвилі всі промені паралельні.

<sup>1</sup> В ізотропному середовищі, тобто в середовищі, властивості якого однакові в усіх напрямках.



**195. Пояснення інтерференції світла.** Встановивши характер світлових коливань і терміни, що сюди належать, спробуємо пояснити явище інтерференції<sup>1</sup>, з якого ми почали вивчення світлових явищ.

Якщо взяти надзвичайно тонку скляну пластинку з паралельними гранями і освітити її паралельними променями якогонебудь одного кольору, то розглядана у відбитих або в прохідних променях пластинка при зміні нахилу променів здаватиметься то більш світлою, то більш темною.

Паралельні промені (рис. 265), що падають на пластинку і проходять всередину скла, зазнають на грані пластинки кількарізного відбивання; тому в будьякому напрямі, наприклад у напрямі  $DS''$ , можуть вийти з пластинки два промені: один промінь  $SC$ , паралельний  $SA$ , що заломився по лінії  $CD$  і вийшов по  $DS''$ ; другий  $SA$ , що заломився по  $AB$  і двічі відбився у точках  $B$  і  $C$ , також виходить у напрямі  $DS''$ .

Через те що промені паралельні, то фронт хвилі плоский, перпендикулярний до напрямку променів і має напрям  $AW$  (рис. 266). В той час як хвиля, що падає в точку  $A$ , проходить до точки  $C$  шлях  $AB + BC$ , хвиля, що падає в  $C$ , проходить тільки відрізок  $EC$ . Треба відзначити, що хвиля в повітрі йде з швидкістю  $v$ , а в склі — з швидкістю  $v_1 = \frac{v}{n}$ , де  $n$  —

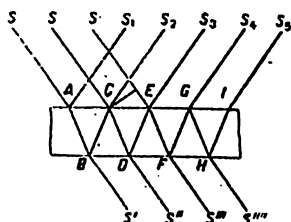


Рис. 265. Пояснення інтерференції у тонкій пластинці.

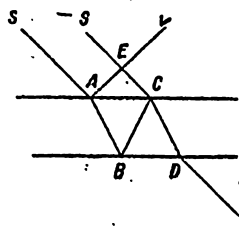


Рис. 266.

показник заломлення лінзи (§ 156, 199). Тому довжині шляху хвилі у лінзі  $AB + BC$  відповідатиме шлях в повітрі, рівний  $n(AB + BC)$ . Якщо на фронті  $AW$  коливання в  $A$  і  $E$  мають однакову фазу, то, зустрічаючись знову в точці  $C$ , до якої вони проходять різні шляхи, вони можуть мати різні фази. Якщо хвилеподібний рух в одному промені відстає від іншого на цілу довжину хвилі, то сбудві хвилі в точності збігаються своїми фазами, амплітуда результуючого коливання буде більша амплітуд складових коливань, і яскравість світла, що проходить, буде найбільша. Якщо ж на зайвому шляху  $[n(AB + BC) - EC]$  одна хвиля відрізняється від іншої на половину довжини хвилі, тобто фази їх протилежні, то коливання взаємно знищуються, їх загальна амплітуда найменша і пластинка здається найменш яскравою.

<sup>1</sup> Пояснення інтерференції дано Юнгом в 1807 році.

Змінювати різницю ходу можна, або змінюючи нахил променів до пластинки, або змінюючи товщину пластинки<sup>1</sup>.

Інтерференція в експерименті з кільцями Ньютона або в нашому початковому експерименті<sup>2</sup> пояснюється так само, як і вище, при чому вона залежить від зміни товщини повітряного проміжка між обома стеклами.

При освітленні пластинки або сферичної лінзи білим світлом різні кольорові смуги в наслідок різниці швидкостей кольорових хвиль у склі не збігаються між собою і утворюються кольорові смуги або кільця (колір мильних бульбашок, масляної плівки, що розпливлася по поверхні води).

196. Поляризація світла. Встановивши хвильовий характер світлових явищ, треба вяснити, поперечні чи поздовжні коливання поширюються в світловій хвилі.

На це питання відповідає така група спроб.

Пучок паралельних променів *L* пускається під кутом падання<sup>3</sup> у  $55^\circ$  на скляну пластинку *P* з зачорненою задньою стороною. (рис. 267).

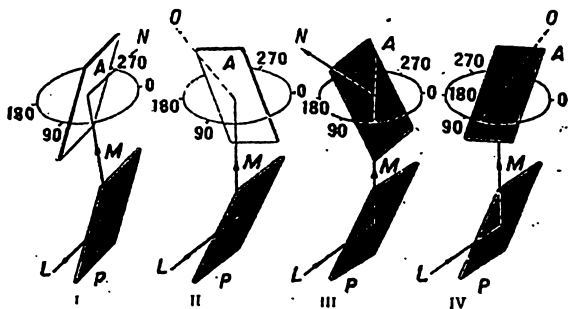


Рис. 267. Поляризація світла в наслідок відбивання від скляної пластинки.

Падаючий пучок розкладається на пучок відбитих променів *M* і пучок заломлених у склі, які вбруться в шарі чорної фарби.

Цей відбитий промінь *M* набув тепер нової властивості, якої не мав промінь *L*.

Як відомо, промінь, що йде безпосередньо від джерела світла, здатний відбиватися від поверхні при будьякому куті падання.

<sup>1</sup> Явище інтерференції в тонких пластинках вперше спостерігалось у 1665 році.

<sup>2</sup> Таким же способом пояснюється і інтерференція у відбитому світлі; тільки треба при цьому пам'ятати, що до різниці ходу, одержаної при різних шляхах і різних швидкостях у повітрі і в склі, в цьому випадку прилучається втрата півхвилі на межі середовища з більшою густиною — скла (ч. II). Явище інтерференції краще спостерігати у відбитому світлі, бо в прохідному світлі один із інтерферуючих променів дуже ослаблений в наслідок подвійного відбиття.

<sup>3</sup> При інших кутах падання явище буде таким самим, але виявиться у менш виразній формі.

Промінь же  $M$ , один раз відбитий від поверхні під кутом  $55^\circ$ , відіб'ється від другого дзеркала  $A$  тільки тоді, коли площини падання в обох дзеркалах збігаються (положення  $I$  і  $III$ , рис. 267), і найбільше ослабляється, якщо площини падання взаємно перпендикулярні<sup>1</sup>.

Описана спроба показує, що в промені  $M$  виникла якась односторонність, в наслідок чого при поверненні променя  $M$  однією стороною до другого дзеркала відбувається явище-повторного відбивання; при поверненні ж його другою стороною, відбивання припиняється.

Ця односторонність променя була відкрита в 1808 р. Малюсом (1775 — 1812) і була названа поляризацією світла.

Така односторонність властивостей світлового променя свідчить про поперечність світлових коливань.

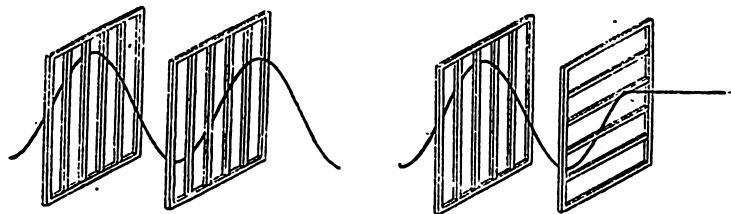


Рис. 268. Модель поляризації коливань.

При поздовжності коливань, тобто при направленості коливань уздовж світлового променя, явище не може залежати від того, якою стороною світловий пучок обернений до відбиваючої поверхні.

Це ми можемо легко зрозуміти, якщо візьмемо якийнебудь приклад пружних поперечних коливань, наприклад, коливання гумового шнура. Приготуємо з дошок дві ґратки з щільними такої ширини, щоб через них вільно проходив шнур. Якщо поставимо ґратки вертикально (рис. 268), пропустимо крізь них шнур і спричинимо в ньому вертикальні поперечні коливання, то хвиля цих коливань вільно поширяться за обидві ґратки. Якщо ж другу з них повернути горизонтально, то коливання шнура, пропущені першою, будуть погашені другою щільною.

Якщо спричинити в шнурі поздовжні коливання, то вони однаково проходять через обидві щільні, як б відносно положення одна щодо однієї вони не мали.

Хвильова теорія світла пояснює явище так. У природному світловому промені світла коливання відбуваються одночасно в усіх можливих напрямках. Тому всі напрямки, перпендикулярні до світлового променя, є в оптичному розумінні рівноправними, цілком однаковими.

При першому відбиванні з усіх можливих поперечних коливань виділяється коливання тільки одного певного напрямку.

Виділення з найможливіших напрямків поперечних коливань одного певного напрямку і називається поляризацією світла.

Світло з одним певним напрямком поперечних коливань називається поляризованим світлом.

Хвильова теорія прийняла, що площина світлових коливань, поляризованіх першим відбиванням, перпендикулярна до площини падання. Про таку поляризацію говорять так: світло поляризоване у площині падання (рис. 267).

Поляризований промінь може відбитися від другого дзеркала, якщо його коливання будуть перпендикулярні до площини падання на друге дзеркало, і погаситися, якщо вони будуть паралельні їй.

<sup>1</sup> При проміжних положеннях дзеркал спостерігається часткове ослаблення друге відбитого променя.

Дзеркало дає можливість визначити: поляризоване чи неполяризоване світло падає на нього. Якщо промінь відбивається від нього при всяких кутах падання, промінь до дзеркала неполяризований; якщо ж відбивання відбувається при одних положеннях дзеркала щодо променя, а при інших — гасіння, то падаючий промінь — поляризований. В цьому випадку дзеркало служить аналізатором.

Отже, явище поляризації дало певну відповідь на поставлене питання: *світло є хвилеподібне поширення поперечних коливань в ефірі.*

197. Поляризація світла при заломленні. *Поляризацію світлового променя можна викликати не тільки заломленням, а й заломленням.*

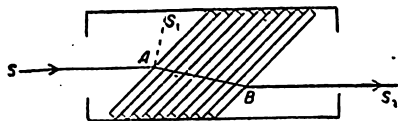


Рис. 269. Пачка тонких пластинок — поляризатор.

Якщо відбивання під кутом в  $55^\circ$  від скляної пластинки виділяє у відбитий пучок промені, поляризовані у площині падання, то пучок заломлених у склі променів, як позбавлений хоч би частки зазначених вище коливань, теж виявляється поляризованим, але не так повно, як відбитий пучок.

Повніша поляризація досягається при багаторазових заломленнях через пачку з 10 — 20 скляних пластинок.

По виході з такої пачки промені поляризуються в площині, перпендикулярній до площини падання; значить, коливання лежать у площині падання (рис. 267).

Така пачка пластинок може служити як поляризатором, так і аналізатором (рис. 269).

198. Принцип Гюйгенса. Ознайомившись з явищами, які привели до створення хвильової теорії світла, спробуємо пояснити на основі цієї теорії деякі з світлових явищ, розглянутих вище. Пояснюють їх з допомогою прийому, даного Гюйгенсом.

Нехай сферична поверхня I рисунка 264 охоплює точки ефіра, в яких в даний момент коливання мають однакову фазу. Через якийсь відрізок часу  $t$  поверхня хвилі, що проходить через ті ж фази, займе в просторі нове положення II. Гюйгенс запропонував розглядати перехід поверхні хвилі з одного положення в інше так. Якщо відомо положення поверхні хвилі для якого-небудь моменту, то всі точки цієї поверхні беруться за центри нових коливань, які за час  $t$  поширяться від цих центрів новими сферичними хвилями на віддаль  $ct$ , де  $c$  — швидкість поширення коливань.

Ці хвилі називаються елементарними хвилями. Ці елементарні хвилі, що приходять в будьяку точку простору з різних точок попередньої поверхні хвилі, інтерферують між собою. Ті з прибулих у розглядану точку коливань, фази яких збігаються, посилюють одне одного; при всякому розходженні фаз вони в тій чи іншій мірі погашаються. Докладна побудова ходу хвиль і розгляд їх фаз, які тут пропускаються, показують, що новий хвильовий фронт, на якому коливання мають однакову фазу, являє собою поверхню, дотичну (або, як її називають, „обвідну“) до всіх уявних сферичних поверхонь, проведених з окремих точок. Даний Гюйгенсом спосіб знаходження нового фронту хвиль називається принципом Гюйгенса.

Принцип Гюйгенса в зв'язку з інтерференцією дає змогу зрозуміти можливість прямолінійного поширення світла при

наявності хвиленодібного руху, який становить основу світло-вих явищ.

Пояснимо з допомогою принципу Гюйгенса і на підставі хвильової теорії світла закони відбивання і заломлення світла:

**199. Пояснення відбивання і заломлення світла хвильовою теорією.** Від світної точки йде сферична світлова хвиля з поперечними коливаннями. Якщо світна точка знаходиться на безкінечно великій віддалі, то кожна окрема невелика ділянка хвилі буде площиною. Напрямок поширення хвилі в певний момент перпендикулярний (нормально) до поверхні хвилі.

Нехай на межу двох різнорідних середовищ  $XU$  (рис. 270) падає хвиля з безкінечно віддаленого джерела; тоді поверхня її буде плоска, яка в перерізі площиною рисунка дасть лінію  $I_1P$ . Всі точки межі, до яких дійшла хвиля, приходять у коливання і самі стають центрами сферичних хвиль. Ці хвилі почасти поширюються у тому самому першому середовищі, звідки вони падають на межу, почасти переходять у друге середовище.

Простежимо спершу за хвилями в першому середовищі (рис. 270).

Падаюча плоска хвиля з поверхнею  $I_1P$  (в перерізі), посуваючись паралельно до себе вперед, послідовно зачепить точки  $I_1, I_2, I_3$  поверхні  $XU$ . Поки коливання проходять шлях  $PI_3$ , всі точки прямої, що перпендикулярна до площини рисунка і проектується в точку  $I_1$ , стануть центрами вторинних хвиль. Переріз однієї з цих хвиль зображено на рисунку; радіус цієї сферичної хвилі  $I_1Q_1$ ; він дорівнює віддалі  $PI_3$  ( $I_1Q_1 = PI_3$ ). Точки  $I_2$  (середини віддалі  $I_1I_3$ ) дадуть хвилі, радіус яких буде вдвоє менший попереднього ( $I_2Q_2 = \frac{1}{2} PI_3$ ), і т. д. В точці  $I_3$  виникнення нової хвилі ще не почнеться (радіус дорівнює нулеві).

З рисунка видно, що вся система утворених сферичних хвиль обведена площиною, що перпендикулярна до рисунка і дає в перерізі пряму  $I_3Q_1$ . Ця площина і буде фронтом відбитої хвилі.

Перпендикуляри до неї  $I_1S'_1, I_2S'_2, I_3S'_3$  показують напрями відбитих променів. Прямокутні трикутники  $I_1Q_1I_3$  і  $I_1PI_3$ , що мають по дві рівні сторони, рівні між собою. Отже,  $\angle PI_1I_3 = \angle Q_1I_1I_3$ . Але кут  $PI_1I_3 = \angle S'_3I_3N = i$ , а кут  $Q_1I_1I_3$  дорівнює куту  $S'_1I_1N = r$ , як кути з перпендикулярними сторонами.

Кут  $i$  є кутом падання променів, кут  $r$  — кутом відбивання променів. З попереднього виходить рівність кутів відбивання і падання, тобто виводиться другий закон відбивання.

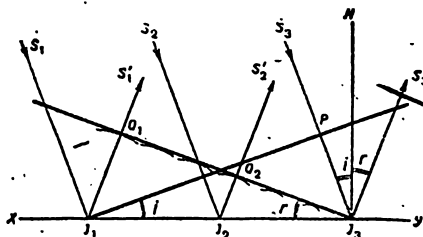


Рис. 270. Пояснення відбивання за хвильовою теорією.

Розглянемо тепер явище заломлення (рис. 271).

Хвилі у другому середовищі поширюються з швидкістю  $c_2$ , відмінною від швидкості  $c_1$  в першому середовищі (наприклад,  $c_2 < c_1$ ). В той момент, коли хвиля дійшла до  $I_1$ , від цієї точки відокремилась нова сферична хвиля; за час  $t$ , протягом якого перша плоска хвиля  $I_1P$  пройшла шлях  $PI_3 = c_1t$ , з точки  $I_1$  встигла відійти хвиля на віддаль  $I_1Q = c_2t$ . Кожна точка поверхні  $I_1I_3$  стає також центром нової сферичної хвилі у послідовні відрізки часу, але радіуси цих хвиль для одного й того ж моменту спадають пропорційно віддалі точок від  $I_1$ . Вся безліч цих сферичних хвиль має спільну дотичну  $QI_3$ , яка і буде фронтом заломленої хвилі. Порівнюючи напрям поширення хвиль (променів) у першому середовищі  $S_1I_1$  і в другому  $I_3S'_1$ , можна

Рис. 271. Пояснення заломлення світла за хвильовою теорією.

бачити заломлення променя, що сталося. Через те що  $\angle I_3I_1P = i$  (куту падання), а  $\angle I_1I_3Q = i'$  (куту заломлення), то  $PI_3 = I_1I_3 \sin i$  і  $QI_1 = I_1I_3 \sin i'$ , звідки:

$$\frac{PI_3}{QI_1} = \frac{I_1I_3 \sin i}{I_1I_3 \sin i'} = \frac{c_1 t}{c_2 t} \cdot \frac{\sin i}{\sin i'} = \frac{c_1}{c_2}.$$

Звідси видно, що показник заломлення є відношення швидкості поширення хвилі в першому середовищі до швидкості поширення її в другому середовищі, що підтверджується спробою.

Щоразу як відбувається зміна швидкостей на межі двох середовищ, змінюється напрям руху. Якщо половину дошки зробити гладкою, а другу — дуже шорсткою (покрита сукном урівень з першою) і пустити скат (2 колеса на спільній осі) під кутом до межі, то, переходячи на шорстку поверхню, скат міняє напрям свого шляху, — відходячись від перпендикуляра, переходячи на гладку, — віддаляючись від перпендикуляра.

200. Пояснення прямолінійного поширення світла за хвильовою теорією. Як же погодити поширення сферичної світлової хвилі від точкового джерела світла з можливістю описувати світлові явища так, як немов би світло поширювалося прямолінійно від джерела світла?

Френель дав таке пояснення прямолінійного поширення світла, застосовавши принцип Гюйгенса і правило інтерференції.

Нехай в якийсь момент світлова хвиля, що вийшла з джерела  $S$ , займає положення  $BC$  (рис. 272). Як ітме світло в точку  $M$ ? Віддаль від точки  $M$  до найближчої точки поверхні хвилі  $A$  позначимо через  $r$ . Проведемо з точки  $M$

ряд сферичних поверхонь радіусами  $r$ ;  $r + \frac{\lambda}{2}$ ;  $r + 2 \frac{\lambda}{2}$ ; і т. д., де  $\lambda$  — довжина хвилі однорідного світла, що поширюється. Ці сфери виріжуть на хвильовій поверхні ряд поясів, або зон (рис. 273). Через те що  $\lambda$  надзвичайно мала порівняно з  $r$ , то всі ці пояси, як можна довести, матимуть однакою пверхні. Кожна зона всіма своїми елементами посилає хвилі в точку  $M$ . Але хвилі кожної дальшої зони відстають від попередньої на половину довжини

хвилі; отже, вони, інтерферуючи, ослаблятимуть одна одну, і тим повніше, чим далі лежатимуть зони від точки *A*.

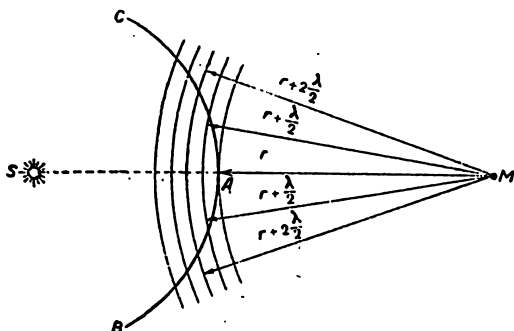


Рис. 272. До пояснення прямолінійного поширення однорідного світла за хвильовою теорією.

Остаточно, в наслідок інтерференції, діяння всієї хвилі на точку *M* таке, як коли б воно походило від половини першої зони. При малості  $\lambda$  такий надзвичайно тонкий пучок і можна вважати за прямолінійний.

**201. Дифракція світла.** Візьмемо точкове джерело світла, поставимо перед ним непрозорий екран, в якому зроблено про-

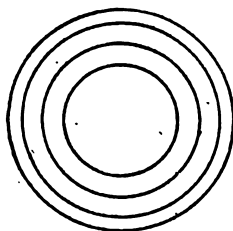


Рис. 273.

кол тонкою голкою, і далі за ним — другий білий екран. На цьому останньому екрані одержимо від світла, що пройшло через отвір, освітлений круг, оточений чергуючими світлими і темними кільцями (рис. 274).

Якщо взяти клиноподібну щілину, поставити її на віддаль метрів із двадцять від джерела і освітити її якимнебудь кольоровим світлом, то на екрані, що стоїть далеко за щілиною, вийде



Френель<sup>1</sup> (1788 — 1827).

<sup>1</sup> Френель Огюстен народився в Бролі у Франції, інженер шляхів сполучення, з 1823 року член Французької академії.

Френель розробив хвильову теорію світла, згідно з якою світло від джерела світла поширюється у вигляді хвиль. На основі уявлення про світло, як про хвильовий процес, Френель докладно розробив пояснення явищ прямолінійного поширення, відбивання, заломлення, інтерференції, дифракції, поляризації і подвійного заломлення світла в кристалах.

хімерно освітлена фігура (рис. 275) з кольоровими смугами, при чому освітлення виходить далеко за геометричні межі освітлення, які відповідають прямолінійному ходові променів (на

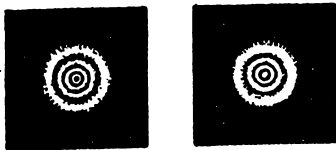


Рис. 274. Дифракційні картини для малого отвору.

рисунок ці межі позначені пунктирними лініями).

Якщо щілина являє собою вузький прямокутник, то по ту й другу сторони від середньої смуги ітнуть, чергуючись, темні й світлі смуги. Нарешті, якщо дивитися на джерело світла, тримаючи коло зіниці ока тонку дротинку діаметром близько 0,2 мм, або дістати її тїнь на екрані, поставленому метра на два від неї, можна бачити в тїньовому просторі дротини кілька світлих і темних смуг (рис. 276).

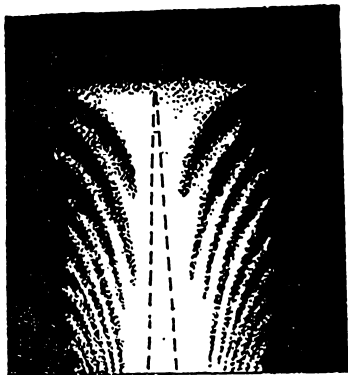


Рис. 275. Дифракційні явища від клиноподібної щілини.

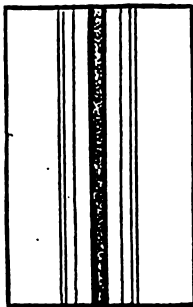


Рис. 276. Дифракційні явища від тонкого дроту.

Всі тількищо описані явища показують, що прямолінійне поширення світла відбувається тільки тоді, коли отвори, що пропускають світло, і предмети<sup>1</sup>, що затримують світло, не будуть надзвичайно малими. В протилежному разі буває *обминання* світлом границь тіл, які затримують світло. *Обминання світлом непрозорих тіл, яке виявляється у відхиленні від прямолінійного ходу променів, називається дифракцією*<sup>2</sup>.

Якщо звук дається перед дуже довгою і дуже високою стіною, то він відіб'ється від стіни і його не буде чути по другий бік її. Але якщо розміри звукозатримного тіла сумірні з розмірами довжини звукових хвиль (що лежать у межах від 1 до 20 м), то звук обминає ці перепони. Всім добре відомо, що можна чути розмову і за рогом будинку, куди безпосередньо не доходить звуковий промінь у прямолі-

<sup>1</sup> Явище відбувається на межі будь-яких тіл.

<sup>2</sup> Дифракція світла відкрита в 1665 р. Дифракційні явища можна бачити при розгляданні ліктарів через стекла, покриті шаром вологи або інею, через примружені віт, через пір'я птахів і тканишу, на крильцях комах, на перламутрі і в багатьох інших випадках.



нійному напрямі. Таке ж обмінання перапонн відбувається при поширенні хвиль по поверхні води (рис. 277).

Отже, дифракція зв'язана з хвилеподібним рухом і може служити доказом хвилеподібного руху.

202. Вимірювання довжини світлової хвилі з допомогою дифракції. Довжину хвилі світла можна виміряти, користуючись явищем дифракції світла. Як приладом для цього можна скористуватися скляною пластинкою, на якій наноситься різцем ряд паралельних, рівновіддалених, дуже близьких одна до одної ліній, що стають непрозорими; проміжки між ними лишаються прозорими. Якщо пропустити через цю пластинку паралельні промені, наприклад червоні, перпендикулярні до пластинки, і зібрати ці промені лінзою в фокусі на екрані, то на екрані виходить яскрава кольорова смужка на тому місці, яке відповідає положенню зображення, побудованого прямолінійними променями; потім по обидва боки середньої яскравої смуги розміщується ряд кольорових смуг темними проміжками (рис. 278).

Нехай відрізок  $a$  (рис. 279) зображає ширину прозорого проміжку, відрізок  $b$  — непрозорого; той і другий виражаються

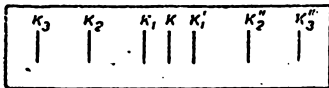


Рис. 278. Дифракційні смуги в одно-рілному світлі від ґрат.

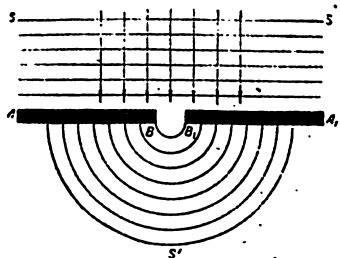


Рис. 277. Дифракція хвиль на поверхні води.  $SS'$  — плоска падаюча хвиля;  $BB_1$  — вузька щілина,  $S'$  — сферична хвиля, що пройшла через щілину.

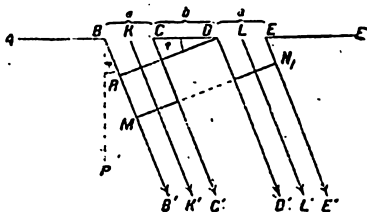


Рис. 279. Вимірювання довжини хвилі за дифракційними смугами.

в дуже малих частинах міліметра. Коли на пластинку падає плоска (через те що промені паралельні) хвиля, то, за принципом Гюйгенса, кожную точку плоскої хвилі можна вважати за центр нової хвилі. Тому точки  $B$  і  $D$  можна взяти за центри нових елементарних хвиль. У напрямі  $BP$  обидві ці хвилі йдуть в одній фазі; в усякому ж іншому напрямі фази їх розійдуться. В наслідок близькості двох точок  $B$  і  $D$  паралельні напрямі  $BB'$  і  $DD'$  можна вважати за одну пряму. Як видно на рисунку, в цьому напрямі хвилі розійдуться на відрізок  $BR$ . Якщо на цьому відрізку вкладається половина довжини хвилі, то обидві хвилі прийдуть до екрана в протилежних фазах і погасять одна одну. Якщо ж на відрізку вкладається ціла довжина хвилі, то обидві хвилі прийдуть

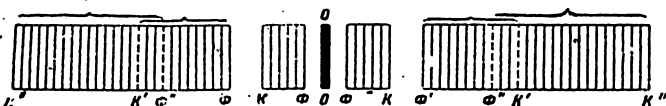
в одній фазі, посилять одна одну і дадуть на екрані кольорогу смугу.

Для вимірювання довжини хвилі досить виміряти віддаль першої бокової кольорової смуги від середньої і обчислити звідси кут  $\varphi$ ; довжина відрізка  $a+b$  вказується при виготовленні пластинки. Вимірювана довжина хвилі  $\lambda$  в цьому випадку дорівнює відрізку  $BR$ .

Із  $\triangle BDR$  маємо:

$$BR = \lambda = (a+b) \sin \varphi.$$

Для різних спектральних кольорів віддаль першої бокової смуги від середньої різна; отже, різні довжини їх хвиль. При освітленні пластинки білим світлом по обидві сторони середньої білої смуги розміщуються кількаразово смуги всіх кольорів спектра -- від внутрішньої фіолетової до зовнішньої червоної.



• Рис. 280: Нормальний дифракційний спектр.

Сукупність кольорових смуг, що безперервно йдуть одна за одною і утворюються при освітленні паралельними променями білого світла заштрихованої скляної пластинки і зібрані в фокусі лінзи, називається дифракційним спектром (рис. 280).

Знаючи довжину хвилі для кожного кольору спектра, можна обчислити і відповідне число коливань за формулою  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ , де  $c$  — швидкість світла в пустоті.

В спектрі дифракційному, у відміну від призматичного, всі кольорові промені розміщуються залежно від довжини їх хвилі; а саме, віддаль кольорових смуг від центральної білої смуги при невеликих кутах відхилення пропорційна довжині хвилі світла; тому дифракційний спектр приймається за нормальний.

### ЗАПИТАННЯ.

1. В чому виявляється інтерференція світла?
2. Який висновок можна зробити з інтерференції щодо виникнення і поширення світлових явищ?
3. Як пояснюється інтерференція світла в тонких пластинках?
4. Що називається поляризацією світла?
5. У чому виявляється поляризація світла?
6. Який промінь називається поляризованим?
7. Які способи поляризації світла ви знаєте?
8. Що називається аналізатором?
9. Який висновок щодо напрямку коливання в світловій хвилі можна зробити з поляризації світла?
10. В чому полягає принцип Гюйгенса і яке він має застосування?
11. Як за хвильовою теорією можна пояснити прямолінійне поширення світла?

12. Як за хвильовою теорією виводяться закони відбивання і заломлення світла?

13. Як виражається показник заломлення речовини через швидкості світла в пустоті і речовині?

14. В чому полягає дифракція світла?

15. Які явища дифракції ви спостерігали?

16. Як за допомогою дифракції виміряти довжину світлової хвилі?

17. Що таке дифракційний спектр?

18. Чим відрізняється дифракційний спектр від призматичного?

203. Дисперсія білого світла на межі двох середовищ. Якщо на межу двох прозорих середовищ падає біле світло, то в дру-

гом у середовищі виникає ще нове явище порівняно з тими, які спостерігались при паданні на межу однорідних кольорових променів. Щоб ясніше спостерігати явище, вмістимо в темній кімнаті джерело білого світла (електричну лампочку з металічним волоском, газову лампу тощо); загородимо це джерело екраном

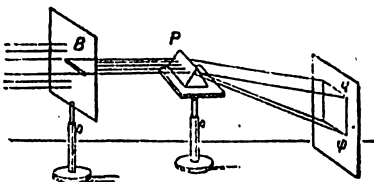


Рис. 281. Дисперсія білого світла.

з вузькою горизонтальною щільною  $B$  (рис. 281); за щільною поставимо призму  $P$  так, щоб ребра її були паралельні щільні, і пропустимо через призму пучок білого світла з щільні, тоді

1) зображення щільні зміститься в сторону основи призми; 2) зображення розшириться; 3) воно буде забарвлене у велику кількість кольорів, що поступово й непомітно переходять один у другий, починаючи від найменш відхиленого — червоного — і кінчаючи найбільш відхиленим — фіолетовим; 4) серед численних кольорів і їх відтінків найвиразніше виділяються по порядку — червоний, оранжевий, жовтий, зелений, голубий, синій, фіолетовий.

Розклад білого світла якоюнебудь речовиною на кольорові промені, з яких він складається, називається дисперсією світла.

*Сукупність просторово поділених кольорових променів називається спектром.*

Всі кольорові промені, що входять до складу променя білого світла, падають на призму під одним кутом падання, виходять з призми під різними кутами. Отже, всі вони мають різні показники заломлення. Найменший показник заломлення у червоних, найбільший — у фіолетових променів.

Через те що показник заломлення дорівнює відношенню швидкості світла в пустоті до швидкості світла в середовищі  $n = \frac{c_0}{c}$ , то з відмінності показників заломлення у різних кольорових променів випливає, що швидкості поширення хвиль різних кольорів у речовині різні: звичайно найменша у фіолетових, найбільша у червоних.

Через те що швидкість поширення хвилі зв'язана з довжиною хвилі співвідношенням  $\lambda = cT$ , де  $T$  — період коливання, то з

явища дисперсії ще раз підтверджується, що довжини кольорових хвиль ідуть, зменшуючись від червоного кольору до фіолетового.

Подана нижче таблиця дає показники заломлення окремих кольорових променів для води, скла і вуглець-сульфіду, причому промінь *A* лежить у червоній частині спектра, *D* — в жовтій, *F* — в голубій, *H* — в фіолетовій.

Речовина	<i>A</i>	<i>D</i>	<i>F</i>	<i>H</i>
Вода . . . . .	1,329	1,333	1,337	1,344
Скло (крон) . . .	1,510	1,515	1,521	1,531
Вуглець - сульфід	1,610	1,629	1,654	1,702

Поки всі кольорові промені йдуть в одному напрямі, вони разом справляють на око враження білого світла. По виході

з призми всі вони відхиляються на різні кути і спричиняють у мозку через зоровий нерв враження різних кольорів. Око не може розкладати самостійно складне світло на його складові частини. Зрозуміло, що кутові віддалі, на які розходяться різні промені в призмі, залежать від заломних властивостей речовини призми; у призмах з різних речовин розміри окремих частин спектра бувають різні.

204. Кожний спектральний промінь — простий. Якщо пропустити пучок будьякого кольорового проміння через щілину экрану, який затримує інші промені, і спрямовувати його на другу призму, то окремі кольорові промені спектра при проходженні через другу призму вже не розкладаються на промені інших кольорів, а тільки відхиляються до основи призми. На цій підставі кожний кольоровий промінь спектра вважається простим; світло такого променя називається однорідним, або монохроматичним.

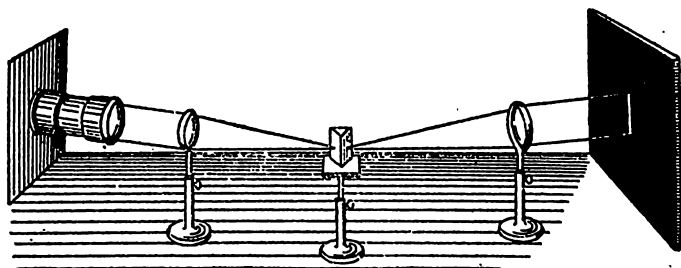


Рис. 282. Синтез білого світла.

205. Синтез білого світла. Якщо на шляху кольорових променів, що виходять з призми (§ 203), поставити велику збірну лінзу (рис. 282) або опукле циліндричне<sup>1</sup> скло так, щоб твірні циліндра були паралельні щілині, то скло збере всі кольорові

<sup>1</sup> Циліндричним склом називається скло, дві поверхні якого відшліфовані у вигляді циліндричних поверхонь.

промені в одне місце екрана, на якому знову появляється біла смужка. Отже, від додавання всіх спектральних кольорів відтворюється біле світло.

Утворення білого світла через додавання всіх спектральних кольорових променів називається синтезом білого світла.

Крім об'єктивного додавання на екрані, можна зробити синтез білого світла через додавання кольорових вражень в оді з допомогою швидкого обертання круга, сектори якого розфарбовані фарбами, які відповідають послідовним спектральним кольорам (рис. 283).

Розклад променя білого світла на кольорові промені, а також додавання спектральних кольорових променів у біле світло зробив уперше Ньютон у 1667 р.

206. Додаткові кольори. Загородимо в попередній установці для синтезу білого світла вузькою смужкою чорного паперу пучок червоних променів, — побачимо на екрані, замість білої смужки, зелено-голубу.

Приймемо загороджуючий папірець, — і знову матимемо біле світло.

Отже, червоне і зелено-голубе дають разом біле світло.

Два кольори, що дають при додаванні біле світло, називаються додатковими кольорами.

Загороджуючи по черзі кожний із спектральних кольорів, можна, як і раніш, одержати на екрані його додатковий колір. Результати спроб подано на діаграмі (рис. 284), в якій додаткові кольори знаходяться на кінцях одного й того ж діаметра.

207. Складання спектральних кольорів. Спроби показують також, що від додавання червоного й зеленого кольорів можна мати всі проміжні, наприклад, оранжевий, жовтий, жовто-зелений та інші, зменшуючи кількість червоного кольору і збільшуючи кількість зеленого. Від додавання зеленого і фіолетового кольорів в різних пропорціях можна також мати всі кольори, що лежать між ними; зелено-голубий, голубий, синій.

Найпростішим способом переконатися у викладеному можна на такій спробі. Треба пофарбувати один сектор круга, наприклад, в червоний колір, сектор, що залишається, — в елений, насадити круг на вісь (відцентрової машини) і привести в швидке обертання. Якщо вибрати добрі однорідні фарби, то при погляді на цей різно пофарбований круг, що швидко обертається, око

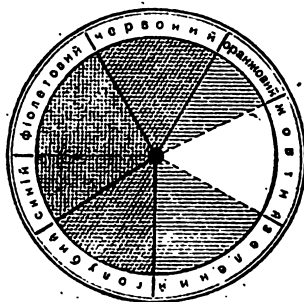


Рис. 283. Круг для суб'єктивного додавання кольорів при його обертанні.

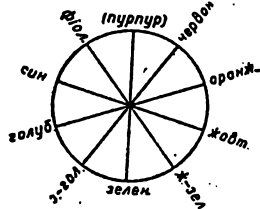


Рис. 284. Діаграма додаткових кольорів.

дістане враження якогонебудь проміжного кольору. При швидкому обертанні в оці не встигає зникнути відчуття від одного кольору, як виникає відчуття іншого. Отже, змішування кольорів відбувається в оці. Мінючи розміри секторів, можна дістати різні проміжні кольори.

#### **Вправа 25.**

1. Навіщо в спробі розкладу білого світла береться саме вузька щілина?
2. Чому при розгляданні предметів через призму без щілини видно тільки ралужну обвідку навколо предмета, а не видно всього спектра?
3. Який буде колір, якщо швидко обертати круг, одна половина якого пофарбована в червоний, а друга в зелено-голубий колір?
4. Який виходить колір, якщо пофарбувати половини круга в додаткові кольори і швидко обертати його? (Проробити що спробу.)
5. Який буде колір, якщо швидко обертати круг, одна частина якого пофарбована в зелений колір, друга в фіолетовий, при чому розміри частин можна міняти? (Проробити спробу.)

#### **ЗАПИТАННЯ.**

1. Що називається дисперсією білого світла?
2. Чим пояснюється розклад білого світла на кольори?
3. З чого складається біле світло?
4. Що таке спектр?
5. Як можна розкласти біле світло на кольори?
6. Нащо потрібна при розкладі світла призма?
7. Як треба поставити призму щодо щілини?
8. Який порядок кольорів у спектрі?
9. Як змінюються показники заломлення променів від одного краю спектра до другого?
10. Що називається синтезом білого світла?
11. Як зробити синтез білого світла?
12. Які кольори називаються додатковими?
13. Як можна знайти пару додаткових кольорів?
14. Із скількох кольорів можна скласти всі спектральні кольори?
15. Як скласти з двох кольорів різні проміжні кольори?

**208. Невидимі промені, випромінювані розжареними тілами.** Досліджуючи з допомогою термометра нагрівання, що містить ртуть, і що містить від кольорових променів спектра, англійський фізик Гершель в 1800 р. відкрив, що нагрівання триває і за межами видимого спектра з боку червоних променів. Це нагрівання виявило існування з спектрі променів, які оком не сприймаються, невидимі, але які так само є носіями енергії, як і промені видимі. За своїм положенням після червоних променів вони дістали назву інфрачервоних.

Тепер інфрачервоні промені досліджуються з допомогою електричних термометрів (пірометрів). Досліджена ділянка інфрачервоного випромінювання лежить між довжиною хвилі в 770 до 342 000 мілімікронів<sup>1</sup> (0,3 мм). Числа коливань цих хвиль лежать у межах від  $390 \cdot 10^{12}$  до  $0,9 \cdot 10^{12}$  на секунду.

Якщо в спробі дисперсії прийняти спектр на екран, покритий барій-платиноціанідом, то ця сіль під впливом синьофіолетових

<sup>1</sup> Мікрон ( $\mu$ ) = 0,001 мм; мілімікрон ( $m\mu$ ) = 0,001  $\mu$ .

промені починає світитися зеленуватим світлом. Це свічення не обмежується крайніми видимими фіолетовими променями, а продовжується далеко за ними.

Також і при фотографуванні спектра фотографічна пластинка зазнає зміни далеко за межами видимого фіолетового кінця<sup>1</sup>. Ці спроби показують, що джерело білого світла випромінює ще хвилі, довжина яких менша, ніж у фіолетових променів.

Промені, що лежать за фіолетовим краєм видимого спектра, були відкриті Рітером в 1801 році і названі ультрафіолетовими.

Тепер ультрафіолетові промені досліджено з допомогою фотографування на протязі довжин хвиль від крайнього фіолетового променя з довжиною в 393 мілімікрони до довжини в 10 мілімікронів. Числа коливань їх лежать між  $763 \cdot 10^{12}$  і  $30\,000 \cdot 10^{12}$  на секунду.

Таблиця довжин хвиль і чисел коливань.

Ділянка спектра	Довжина хвилі в мілімікронах	Число коливань на секунду
Межа дослідженої інфрачервоної частини	342 000	$0,9 \cdot 10^{12}$
Межа червоної частини . . . . .	770	$390 \cdot 10^{12}$
Лінія А в червоній частині <sup>2</sup> . . . . .	759	$395 \cdot 10^{12}$
• С, оранжевій . . . . .	656	$457 \cdot 10^{12}$
• D, жовтій . . . . .	589	$509 \cdot 10^{12}$
• E, зеленій . . . . .	527	$570 \cdot 10^{12}$
• F, голубій . . . . .	486	$617 \cdot 10^{12}$
• G, синій . . . . .	431	$697 \cdot 10^{12}$
• H, фіолетовій . . . . .	397	$756 \cdot 10^{12}$
Межа фіолетової частини . . . . .	393	$763 \cdot 10^{12}$
Межа дослідженої ультрафіолетової частини . . . . .	10	$30\,000 \cdot 10^{12}$

Наведеними межами не зкінчується ділянка досліджених коливань. Тільки інші види коливань збуджуються іншими способами, ніж розглянуті досі.

**209. Типи спектрів випускання.** Так само як ми одержали спектр від вольтової дуги або від жарової лампочки, можна одержати спектр будьякого розжареного тіла. Дослідження спектрів робиться з допомогою прилада, що називається спектроскопом.

Зовнішній вигляд спектроскопа зображено на рисунку 285; хід променів у ньому видно на рисунку 286.

Основні частини спектроскопа: дві труби з лінзами і призма. В першій трубці міститься лінза  $L_1$ , в головному фокусі якої знаходиться щілина S.

Освітлювана досліджуванним джерелом світла щілина S посилає на лінзу  $L_1$  пучок розбіжних променів, які лінза перетворює в пучок паралельних променів. Ці паралельні промені

<sup>1</sup> Для цієї спроби треба брати призми й лінзи з кварцу (§ 213) або одержувати дифракційний спектр.

<sup>2</sup> Буквами A, B, C... позначаються певні спектральні лінії. Положення цих ліній вивчається в § 218.

заломлюються в призмі, розпадаючись на пучки кольорових променів. Всі червоні промені будуть паралельними між собою, всі зелені — паралельними один одному і т. д. — однорідні промені підуть паралельними пучками.

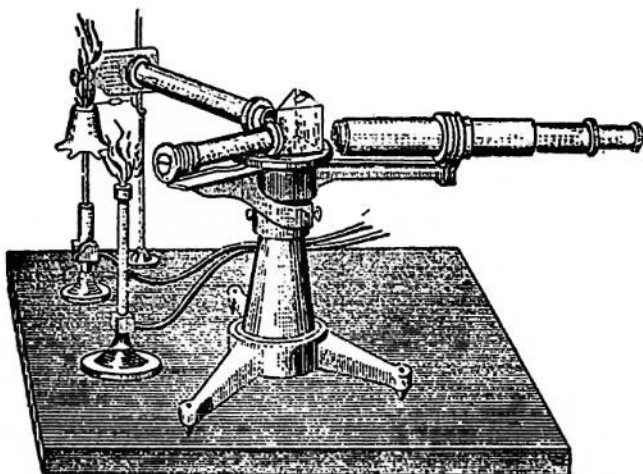


Рис. 285. Спектроскоп (зовнішній вигляд).

Кольорові промені, що вийшли з призми, приймаються на лінзу  $L_2$  другої труби.

Опукла лінза  $L_2$  збере кожний паралельний пучок кольорових променів в одну смужку в площині, що проходить через головний фокус. В цьому місці вийде дійсний спектр малого розміру. Цей спектр розглядається через третю лінзу  $L_3$ , вставлену в



Рис. 286. Спектроскоп (хід променів).

ту саму трубу. Лінза  $L_3$  поміщається так, щоб спектр лежав ближче її головного фокуса; тоді око бачить уявне збільшене зображення спектра.

Спектр, одержуваний від світних тіл, називається спектром випускання. Дослідження встановлюють такі типи спектрів випускання.



1. Суцільний спектр складається з усіх кольорових променів, що безперервно йдуть один за одним.

Суцільний спектр виходить від розжарених твердих і рідких тіл<sup>1</sup>; такі, наприклад, розжарені або розтоплені метали, вугілля при температурі понад 1000°.

Суцільний спектр однаковий для всіх розжарених твердих і рідких тіл, незалежно від їх хімічного складу.

2. *Лінійчастий спектр складається з окремих кольорових ліній, розділених темними проміжками.*

Лінійчастий спектр утворюється від розжарених газів і пари при тиску, що не дуже перевищують нормальний.

Для розжарювання пари багатьох елементів досить уміщувати крупинки їх солей в безколірне полум'я газового або навіть спиртового пальника. При температурі полум'я сіль розкладається, метал випаровується, пара його розжарюється і дає лінійчастий спектр на фоні слабого суцільного спектра полум'я пальника. Для речовин, що розпадаються при дуже високій температурі, можна одержувати розжарену пару, уміщуючи речовину на вуглини вольтової дуги.

Газу приводяться в свічення пропусканням через них електричного розряду в так званих гейслерових трубках, тобто трубках, заповнених газами під низьким тиском.

*Кожний хімічний елемент в стані розжареної пари має свій власний, тільки йому властивий, лінійчастий спектр.*

Лінійчасті спектри різних елементів відрізняються один від одного: кольором (місцем), числом, інтенсивністю своїх променів як у видимій, так і в невидимій частинах спектра.

Число ліній може мінятися від однієї до кількох сотень (у пари заліза) (див. таблицю спектрів у кінці книги).

3. *Смучастий спектр складається з окремих кольорових смуг;* утворюється при електричному розряді через газу, не дуже розріджені, і зв'язаний з процесами, що відбуваються в молекулах, які не розквалися на окремі атоми.

Спектроскопом великої роздільної сили смуги можуть бути почасті розкладені на окремі лінії.

210. Залежність випромінювання від температури. Для встановлення залежності випромінювання від температури промениста енергія окремих частин спектра вбирається тонкою зачорненою металічною стрічкою прометра (§§ 63, 68) і в ній перетворюється в теплову. Через те що товщина стрічки становить 0,01 мм, то, вміщуючи її вузьким ребром у різні частини спектра, можна послідовно виміряти енергію, що приноситься коливаннями з неперервно змінною довжиною хвилі.

Результати вимірювання можна зобразити графічно. На рисунку 287 абсциси пропорціональні довжинам хвиль. Ординати пропорціональні величині енергії, що приноситься променями, які відповідають кожній довжині хвилі.

<sup>1</sup> Суцільний спектр від полум'я газу, свічки або лампи утворюється розжареними частинками вугілля, що носяться в полум'ї (копоті).

Зображені на рисунку дані стосуються до випромінювання абсолютно чорного тіла.

*Абсолютно чорним тілом називається тіло, що вбирає всю променисту енергію, яка падає на нього ззовні.*

Практично можна здійснити абсолютно чорне тіло у вигляді порожнистого, твердого тіла з вичорненою внутрішньою поверхнею, яке має малий отвір. Промениста енергія, що ввійшла через малий отвір, зазнаватиме кількаразового відбивання, через що

практично промениста енергія не вийде назовні (приклад абсолютно чорного тіла — сітчаста оболонка ока, отвір — зіниця).

Якщо виготовити з азбесту абсолютно чорне тіло у формі довгого циліндра, в основі якого зроблено малий отвір, то, обмотавши його дротом, можна нагрівати його електричним струмом до різних температур. Теоретичне дослідження розподілу енергії в спектрах розжарених до різних температур абсолютно чорних тіл привело до результатів, поданих на рисунку 287.

На рисунку дано п'ять кривих, що відповідають джерелам різної температури. З розгляду кривих випливає: 1) загальна

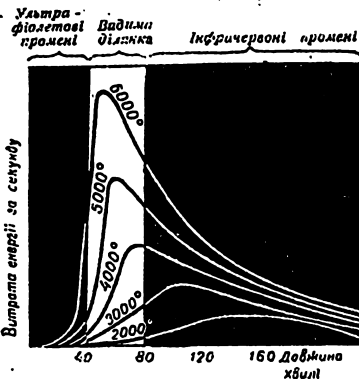


Рис. 287. Розподіл енергії в спектрах абсолютно чорного тіла.

кількість<sup>1</sup> енергії, випромінюваної тілом, зростає з підвищенням температури; 2) хвилі різних довжин несуть різні кількості енергії; максимум енергії, яка приноситься окремою хвилею з підвищенням температури, переміщується в сторону більш коротких хвиль; 3) майже для всіх земних джерел максимум енергії припадає на інфрачервоне проміння; тільки джерело найвищої температури в 4000° — вольтова дуга — має максимум енергії, що відповідає червоному світлу<sup>2</sup>.

Кожній температурі відповідає певна довжина хвилі, на яку припадає переважна роль у випромінюванні. Такий розподіл енергії за довжинами хвиль буває при випромінюванні тільки абсолютно чорного тіла.

Для тіл не абсолютно чорних криві випромінювання відрізнятимуться від наведених, зберігаючи в основному такий же характер. Крива на рисунку 288 показує розподіл енергії в спектрі

<sup>1</sup> Вона пропорційна площі, обмеженій кривою, віссю абсцис і крайніми ординатами.

<sup>2</sup> Виняток становить здобута Луммером в 1915 р. вольтова дуга під тиском близько 20 атмосфер; в її спектрі максимум припадає на голубі промені; її температура дорівнює 7500°; такий же виняток становить вольфрам розжарений миттєвим, дуже сильним струмом до температури, що досягає 28 000°. Ці джерела світла технічно ще не використані.

Сонця. З рисунка видно, що 1) найбільшу енергію несуть жовті промені; 2) від жовтих променів кількість енергії повільно спадає в бік інфрачервоних променів і швидко — в бік ультрафіолетових; 3) загальна кількість енергії, що припадає на невидимі промені, дуже значна; 4) зниження кривої як у видимій, так і в невидимій частинах припадає на лінії вбирання (§ 215).

*Кількість енергії, що доставляється Сонцем зб одну хвилину  $1 \text{ см}^2$ , зміщеному перпендикулярно до сонячного проміння на межі земної атмосфери, називається сонячною сталою і дорівнює  $1,94 \text{ кал}$ .*

До земної поверхні доходить близько половини цієї кількості, залежно від стану атмосфери.

За знаходженням максимуму сонячної енергії в жовтих променях можна обчислити (наближено) температуру поверхні фотосфери Сонця. Обчислення дають  $6000^\circ$  за абсолютною шкалою.

211. Зміна випромінювання з температурою. На підставі досліджень по розподілу енергії в спектрі при різних температурах можна скласти собі таку картину випромінювання енергії тілами.

Тіла випромінюють енергію при всякій температурі. При низьких температурах випромінюються інфрачервоні промені,



Рис. 288. Розподіл енергії в спектрі Сонця.

що відповідають дуже довгим хвилям, і загальна кількість енергії мала. При підвищенні температури додаються промені, що відповідають коротшим хвилям; загальна кількість енергії підвищується, і максимум енергії пересувається у бік коротших хвиль. Тільки при температурі трохи вищій  $500^\circ$ , при загальному підвищенні кількості випромінюваної енергії, стають настільки інтенсивними перші видимі промені — червоні, що вони починають діяти на око. Нарешті, при температурі вище  $1000^\circ$  виявляються фіолетові промені, з'являється весь видимий спектр, настає білий жар, а потім з'являється і ультрафіолетове проміння.

Тіла обмінюються випромінюваною енергією; але тіло з вищою температурою випромінює за одиницю часу більше енергії, ніж дістає від інших тіл; його запас енергії зменшується, і воно остигає; тіло ж з нижчою температурою вбирає більше, ніж випромінює, і нагрівається.

*Енергія, що поширюється в просторі від тіла, яке посилає електромагнітні хвилі, називається променистою енергією; випускання променистої енергії називається випромінюванням.*

Як видно з попереднього розгляду, світлова енергія становить тільки невелику частину променистої енергії, що випускається світним тілом.

Взагалі найбільше видиме світлове випромінювання (майже 40%) припадає на температуру в 6700° абс. При підвищенні температури вище цієї значно збільшується інтенсивність ультрафіолетових променів, і частка світлового випромінювання в загальному випромінюванні знову починає спадати.

212. Поширення в середовищах невидимих випромінювань. Той факт, що невидимі промені відкрито в спектрі нормальному, або призматичному, показує, що хвилі невидимих випромінювань поширюються так само, як і світлові, тобто в одно-

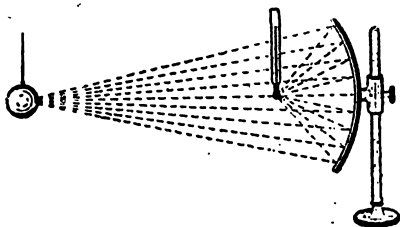


Рис. 289. Відбивання невидимих променів.

рідному середовищі мають пряmolінійний напрям; при зустрічі з перепонами або отворами, своєю величиною дуже близькими до довжини їх хвиль, вони зазнають дифракції, при чому хвилі інтерферують; через межі двох різнорідних тіл хвилі проходять з заломленням.

Відбивання невидимих променів добре можна виявити дзеркалами Пікте (рис. 289). Перед угнутих металічним дзеркалом ставиться нагріте тіло, що посилає інфрачервоне проміння. Якщо в спряженому фокусі дзеркала вмістити жмутик піроксилінової вати або термометр, то вата спалахує, а термометр показує підвищення температури.

Нагрівання тіл, уміщених у фокусі дзеркала, показує, що невидимі промені, які поширюються від джерела, збираються дзеркалом у його фокусі, де створюють підвищення температури.

Вся сукупність наведених даних досліду встановлює те положення, що невидимі промені температурного випромінювання підлягають тим самим законам поширення й проходження через межі двох середовищ, що й видимі промені.

213. Прозорість тіл. Промені всякого роду, що падають на поверхні тіл, почасти відбиваються, почасти проникають всередину тіла. Добре полірована поверхня називається дзеркальною. Якщо поверхня шорстка і якщо вона розсіює всі кольорові промені білого світла, що падає на неї, в одному й тому ж відношенні, то така поверхня називається білою.

Якщо поверхня відбиває лише частину різних кольорових променів білого світла, що падає на неї, а другу пропускає всередину тіла, то поверхня виявляється кольоровою, забарвленою. Її колір відповідає суміші тих кольорових променів, які

поверхня відбиває з усієї сукупності променів, що входять до складу білого світла, яке падає на неї. Таке, наприклад, забарвлення квітів, тварин, тіл неорганічної природи. Від цього ж залежить колір пофарбованих тканин та різних інших кольорових непрозорих предметів.

Треба відмітити, що колір тіл, які відбивають тільки деякі довжини хвиль, залежить від того світла, яким вони освітлюються. Стюжка червоного сукна здається яскраво забарвленою у червоній частині спектра, слабо забарвленою — в жовтій, чорною — в інших частинах спектра.

Тіло, що вбирає всі промені, що на нього падають, називається абсолютно чорним тілом. Найближче до нього підходить сажа. Тіло, що пропускає через себе промені, які на нього падають, називається прозорим. У звичайне поняття прозорості ми повинні внести значне обмеження. У побуті називаються прозорими тіла, що пропускають промені світла. Взагалі ж тіло цілком прозорих немає. Існує тільки прозорість для певних довжин хвиль. Одне й те ж тіло може бути прозорим для одних променів і непрозорим для інших. Із зміною довжини хвилі змінюється здатність світла проходити без вбирання або не проходити через дану речовину. Для певної довжини хвилі не існує абсолютної прозорості: всяке тіло у більшій чи меншій мірі вбирає пропусканій певний вид променів.

Вміщуючи на шляху променів, що йдуть від дуже розжареного джерела випромінювання, різні речовини, досліджуючи дифракційний спектр, що утворюється, і порівнюючи його з нормальним спектром, можна помітити, які довжини хвиль увібрала дана речовина і для яких вона прозора.

Спроби такого роду показують, що прозорими для видимих і непрозорими майже для всіх невидимих променів є вода, лід, галуш, скло.

Прозорі для світлових і інфрачервоних променів, але непрозорі для ультрафіолетових, — кам'яна сіль, вуглець-сульфід, озон. Кварц прозорий і для ультрафіолетових променів.

Розчин йоду у вуглець-сульфіді і ебоніт пропускають інфрачервоні промені, будучи непрозорими для інших.

На цій же підставі, якщо хочуть дістати невидимі промені в призматичному спектрі, призми треба ставити не склячі. Ковпачки тих електричних лампочок (ртутних), від яких хочуть мати ультрафіолетові промені, треба виготовляти з кварцу.

Речовини можуть бути різно прозорими і для різних довжин хвиль видимого випромінювання. Від цієї властивості залежить колір речовин, розгляданих у прохідному світлі, наприклад, колір так званих прозорих рідин, різних сортів скла, кристалів тощо.

Якщо помістити за щільною на шляху білих променів до призми добре червоне скло, то побачимо, що на екрані лишиться від спектра тільки червона смужка, всі ж інші зникнуть.

Якщо ж помістити зелене скло, то лишаються середні кольорові смужки — жовта, зелена, зелено-голуба. При вміщенні ж

фіолетового — пропадають усі, крім фіолетової і вузької смужки червоної.

Щоб дослідити колір рідин, їх наливають у вузьку посудину з плоскими паралельними стінками і ставлять її на шляху білих променів.

Розчин мідного купоросу (синій) пропускає синій край спектра; вбирання світла є одностороннім. Розчин мідь-хлориду (зелений) пропускає середню частину спектра: вбирання двостороннє. Розчин хлорофілу вбирає смугами: суміжні частини червоної і оранжевої смуги, обмежену частину оранжево-жовтої, окремі пучки променів — у кінці жовтої і на початку зеленої; ослаблюється вся синьо-фіолетова частина.

*Висновок із спроб: кольорові прозорі тіла вбирають одну частину білого світла, що на них падає, а другу пропускають; їх колір відповідає суміші пропущених ними кольорових променів.*

Спектри з темними смугами, одержані після проходження білого кольору через тіла, називаються спектрами вбирання.

В тонких шарах повітря, вода, лід, скло, сульфатний ефір і багато інших прозорих речовин — безколірні. Але ті самі тіла в товстих шарах проявляють вибірне вбирання і виявляються забарвленими. Згадайте голубуватий колір льодових глибок або колір води. Навпаки, тіло, непрозоре в товстих шарах, виявляється прозорим для якихнебудь видів довжин хвиль в дуже тонких шарах. Так, навіть метали у вигляді найтонших листів пропускають деякі довжини хвиль, в тому числі і світлові хвилі, наприклад, тонкий лист золота просвічує зеленим кольором.

Світлопрозоре тіло втрачає частину своєї прозорості, коли в ньому змудені частинки інших речовин з іншими показниками заломлення. Тоді на межі їх відбуваються численні відбивання, і світлові промені можуть не пройти через товщу речовини. Так, повітря втрачає частину своєї прозорості, коли в ньому утворилося багато водяної пари або носить багато пилу. На війні, щоб приховати від ворога рух колон, суден або розташування артилерії, навмисне зменшують прозорість повітря, влаштуваючи так звані „димові заслони“.

**214. Змішування фарб.** Попередній розгляд дає фізичну основу для змішування фарб, яке має дуже велике технічне значення. Змішування фарб відрізняється від змішування спектральних кольорів. Для визначення кольору суміші двох або кількох фарб в прохідному світлі треба, як і раніше, дослідити кожну з них. Якщо, жовта фарба пропускає\* оранжеві, жовті, зелені промені, а синя фарба пропускає зелені, голубі, сині промені, то через суміш обох цих речовин пройдуть не затримуючись тільки зелені промені, а інші будуть затримані тим чи іншим тілом. Колір суміші вийде зелений.

*Взагалі колір суміші різних фарб складеться з тих кольорових променів, які одночасно пропускаються всіма фарбами, що входять у суміш.*

Так само визначається колір суміші і в разі відбивання від барвних речовин, бо при відбиванні відбувається вбирання не на геометричній поверхні, а в межах найтоншого поверхневого шару, всередині якого також відбувається вибірне вбирання, тобто вбирання окремих видів променів.

## **Вправа 26.**

1. Які промені пропустять складені разом червоне й зелене стекла (див. § 213)? зелене й фіолетове? червоне й фіолетове?

2. Яким здаватиметься розчин мідь - хлориду і мідного купоросу при освітленні їх через червоне скло? зелене? фіолетове?

3. Якого кольору буде червона хустка при освітленні її синім кольором?

4. Одна фарба пропускає жовті, зелені, голубі промені, друга — червоні, жовті, зелені промені, третя — зелені, голубі, сині. Які промені пройдуть через суміш усіх фарб?

5. Якби не було розсіювання світла в атмосфері, в якому порядку було б видно кольорові промені від Сонця в останній момент заходу або в перший момент сходу?

6. Чому під час місячних затемнень Місяць здається забарвленим у темно-вишневий колір?

**215. Спектр вбирання променів розжареною парою.** Серед явищ вбирання променів треба окремо відмітити випадок вбирання променів при пропусканні білого світла через розжарені пару або газу, що дають свій власний лінійчастий спектр випускання.

Якщо в установці § 203 поставити між джерелом білого світла і щільною пальник з розжареною парою натрію, то з суцільного спектра на екрані зникнуть ті самі жовті лінії, які є в спектрі випускання натрію. На їх місці будуть темні смуги.

Якщо вмістити на те саме місце пальник з розжареною парою калію, то в суцільному спектрі з'являться темні лінії на тих самих місцях, де в спектрі випускання пари калію знаходяться кольорові лінії. Так само при пропусканні білого світла через розжарену пару заліза в суцільному спектрі утворюються ті сотні темних ліній, які відповідатимуть лініям спектра випускання пари заліза.

*Суцільний спектр, перетятий темними лініями або смугами і утворюваний при проходженні білого світла через розжарену пару, називається спектром вбирання.*

Для кожного елементу його лінійчастий спектр випускання і спектр вбирання мають оборотність: кольорові лінії випускання точно відповідають темним лініям вбирання (див. таблицю в кінці книги).

Якщо два джерела випускають в тому самому напрямі однакову кількість світла, то спектр залишається суцільним. Якщо ж сила світла вбираючого джерела більша, ніж першого випромінюючого, то на фоні суцільного спектра виділяються більш яскраві кольорові лінії спектра випускання цієї пари.

**216. Закон Кірхгофа для вбирання й випускання.** Виникнення спектра вбирання парою, зворотного спектру випускання її, можна пояснити тільки тим, що з усього потоку білого світла, яке падає на неї, розжарена пара вбирає ті самі кольорові промені, які вона сама випускає. В цьому разі має місце той самий резонанс, з яким ми зустрічались і при коливанні маятника і в звукових явищах. Розжарена випромінююча пара вбирає енергію тих хвиль, які вона сама в даний момент випускає.

Досліджуючи ці і інші такі ж випадки, Кірхгоф в 1859 р. прийшов до такого загального закону :

**Всяке тіло вбирає ті промені, які воно само в даних умовах випускає.**



Кірхгоф<sup>1</sup> (1824 — 1887).

Найуживаніший такий спосіб вимірювання вбирної здатності : світло від постійного джерела спрямовується на металічний круг, поверхня якого вкрита випробуваною речовиною. Знаючи підвищення температури круга за 1 сек., його масу і теплоємність, можна обчислити кількість теплоти, вбраної поверхнею круга за 1 сек. Звичайно вимірюється не абсолютна вбирна здатність, а відносна — щодо сажі, для якої ця здатність береться за 100.

Різні речовини можна розмістити в ряд за їх відносною вбирною здатністю при освітленні певним джерелом, наприклад : при освітленні розжареною платиною сажа має вбирну здатність, позначувану через 100; туш 95; свинцеве білило 56; метали 13. Загалом, чим біліший колір поверхні і краще її полірування, тим менша її вбирна здатність.

Вимірювання відносної випромінної здатності речовин щодо сажі цілком підтвердили закон Кірхгофа.

*При однаковій температурі для одних і тих же променів вбирна і випромінна здатності різних речовин знаходяться в одному й тому ж відношенні.*

Отже, найменш випускаючою повинна бути біла блискуча (полірована) поверхня, найбільш — чорна матова.

Властивість кожного хімічного елементу давати в стані розжареної пари особливий лінійчастий спектр дала можливість Кірхгофу і Бунзену розробити в 1859 р. прийоми спектрального аналізу.

**217. Спектральний аналіз.** Спектральним аналізом називається визначення хімічного складу тіла за його спектром.

Щоб зробити спектральний аналіз, вводять крупинку досліджуваної речовини на платиновій петельці в полум'я газового пальника. Потім на полум'я пальника, в якому розжарилася пара тих елементів, з яких складається тіло, направляють щі-

<sup>1</sup> Кірхгоф Густав народився в Кенігсбергу, з 1850 року професор у Бреславі, з 1874 р. — в Берліні.

Кірхгоф розробив метод спектрального аналізу, відкрив закон про співвідношення випромінної і вбирної здатностей тіл, розробив теорію розгалуження струму, ввів формулу швидкості звуку в трубі.



лину спектроскопа і порівнюють одержаний лінійчастий спектр з таблицями спектрів усіх відомих елементів.

Якщо, наприклад, в досліджуваному спектрі є лінії, число і місця яких точно відповідають спектральним лініям пари кальцію, то роблять висновок, що в складі досліджуваного тіла є кальцій. Виділивши лінії знайденого елемента, починають порівнювати з таблицями інші лінії. Знайшовши в них, наприклад, лінії барію, роблять висновок про наявність у тілі барію і т. д., поки не порівняють з таблицями всі спектральні лінії.

Якщо ж в досліджуваному спектрі будуть лінії, що не збігаються з лініями спектрів відомих хімічних елементів, то роблять висновок, що в тілі є новий невідомий елемент, який пробують виділити хімічними прийомами.

Так, в перші ж роки застосування спектрального аналізу були відкриті елементи: рубідій і цезій — в 1860 р., талій — в 1862 р., гелій, знайдений за сонячним спектром в 1868 р. і відкритий на Землі в 1895 р.

Спектральний аналіз можна робити як за спектром випускання, так і за спектром вбирання.

Особливе значення спектрального аналізу порівняно з хімічним аналізом полягає в тому, що, поперше, цей прийом має виняткову чутливість: так, для спектрального аналізу досить мільйонної частини міліграма речовини; подруге, спектральним аналізом можна визначати склад світлих тіл, що знаходяться від нас на будь-яких величезних відстанях, наприклад, атмосфери Сонця, зір, комет, туманностей.

За останні 15 років розвинувся кількісний спектральний аналіз. Його завданням є визначення кількісних співвідношень між елементами, що входять до складу досліджуваної речовини, за спектром цієї речовини. Кількісний спектральний аналіз оснований на тому, що інтенсивність різних ліній у спектрі елемента залежить від концентрації цього елемента в досліджуваній речовині.

Якщо скласти таблицю інтенсивностей спектральних ліній для певних концентрацій, то, одержавши спектр досліджуваної речовини, можна порівнювати інтенсивність його ліній з таблицями і вивести з цього порівняння висновок про кількість, в якій кожний з елементів входить до складу хімічної сполуки.

**218. Спектр Сонця та інших світил.** Спектр Сонця — суцільний спектр, перетятий майже 20 000 ліній вбирання, що знаходяться у видимій і невидимій частинах його. Суцільний спектр утворюється від блискучої поверхні Сонця, яка називається фотосферою. Її суцільний спектр указує на те, що у фотосфері речовини знаходяться в розжареному рідкому або пароподібному стані під величезним тиском. Два десятки тисяч ліній вбирання пояснюються тим, що біле світло фотосфери проходить через сонячну атмосферу, яка складається з розжарених газів і пари, що, проте, мають нижчу температуру, ніж фотосфера. На протязі сонячної атмосфери кожний газ і пара вби-

раість ті промені, які вони самі випускають (за законом Кірхгофа). Тому *сонячний спектр, що доходить до нас, є спектром вбирання*.

Роблячи за цим спектром вбирання спектральний аналіз, можна встановити хімічний склад сонячної атмосфери.

З найбільш поширених на Землі елементів в сонячній атмосфері знайдені: водень, гелій, кисень, кальцій, натрій, калій, залізо, мідь, нікель, кобальт, стронцій, магній, хром та інші.

Лінії вбирання вперше спостерігав у 1817 р. Фраунгофер, через що всі лінії вбирання дістали від його імені назву фраунгоферових. Спостережені ним найбільш виразні вісім ліній позначаються буквами (див. таблицю в § 208).

Планети і їх супутники є темні тіла, вони світять відбитим сонячним світлом, мають спектр, однаковий з Сонцем; через це їх склад по спектру узнати не можна<sup>1</sup>.

Зорі — тіла самосвітні і мають власні спектри.

За видом спектрів зорі можна звести в такі три великі групи<sup>2</sup>.

До складу першої групи входять зорі, спектр яких суцільний з лініями вбирання водню й гелію. Атмосфера цих зір складається з водню й гелію. Вони мають біле або голубувате забарвлення; температура їх лежить між 14 000 і 18 000°<sup>3</sup>.

Друга група має спектр, схожий на сонячний спектр, отже, має схожий з Сонцем склад атмосфери. Це — зорі жовтуваті, з температурою від 5000 до 7000°<sup>4</sup>.

Спектр третьої групи перетятий широкими смугами вбирання. Ці смуги вказують на утворення в зоряній атмосфері складних хімічних сполук. Вони мають червонуватий колір і температуру в 3000 — 3500°. До цієї групи належить більшість слабких зір.

Спектри туманностей показують, що одні з туманностей складаються з газів, переважно водню і гелію, інші туманності дають зоряний спектр.

Спектри кометних хвостів дають можливість поділити кометні хвости за їх хімічним складом на три типи: в першому типі хвіст складається з водню, гелію, вуглець-оксиду; у другому — з важких газів і пари металів, в третьому — з великих частинок важких металів.

**219. Рентгенове проміння.** В 1895 р. німецький фізик Рентген відкрив, що потік електронів, ударяючись об скло круксової трубки або об якунебудь іншу перепону і раптово зупиняючись, дає початок особливому випромінюванню.

Промені цього випромінювання за його ім'ям були названі рентгеновими променями.

Рентгенове проміння має такі властивості.

1. Воно *не відхиляється* ні в магнітному, ні в електричному полях. Отже, воно не являє собою потоку заряджених частинок і є промінням, *подібним до світлового*.

2. Воно *іонізує* гази, роблячи їх електропровідними. Під їх впливом заряджений електроскоп розряджається.

<sup>1</sup> Тільки на Юпітері в екваторіальній частині є червонувата самосвітна смуга.

<sup>2</sup> В астрономії прийнятий більш докладний поділ.

<sup>3</sup> Такі, наприклад, Бета, Сіріус, Альтаір.

<sup>4</sup> Такі, наприклад, Сонце, Капелла, Арктур, Альдебаран.

3. Воно спричиняє *свічення* різних речовин. Свічення можна спостерігати на екранах, покритих барій - платиноціанідом.

4. Воно *діє*, як ультрафіолетове проміння, на *фотографічну пластинку*. Три останні властивості його служать засобом спостереження і вивчення його.

5. Воно *краще* всіх інших раніш розглянутих видів випромінювання *проходить* через товщу різних речовин, проникаючи на тим більшу глибину, чим менша в цілому густина речовини. З металів найбільш проникним є алюміній, найменш — свинець. Клітковина, дерево, кістки, тканини проникні в різній мірі.

На цій властивості основане величезне технічне і медичне застосування рентгенового проміння. В наслідок різної міри проникності шкіри, мускулів, кісток виявилось можливим з допомогою рентгенового проміння одержати на екрані, що світиться під впливом цього проміння, або на фотографічній пластинці зображення скелета і нутрощів людського тіла. Само собою зрозуміло, що таке розглядання нутрощів живої людини дає велику допомогу в медицині, дозволяючи спостерігати хворобливі утвори всередині організму, і особливо в хірургії, виявляючи переломи; нарости або проникнення сторонніх тіл, яке вимагає хірургічної операції.

Тією ж властивістю проміння користуються при дослідженні якості металічних виробів, виявляючи з допомогою проміння наявність усередині їх пустот та інших дефектів.

6. Рентгенове проміння може бути поляризованим (відкриття Баркла). Воно зазнає відбивання від дзеркал, але тільки дифузного, розсіяного, але не дзеркального, бо довжини рентгенових хвиль настільки малі, що як би поверхня не була добре полірована, вона для таких малих хвиль буває шорсткою; рентгенове проміння зазнає заломлення і повного внутрішнього відбивання. В 1912 р. відкрита дифракція рентгенового проміння, але тільки не від звичайних дифракційних ґрат, які занадто грубі для нього, а від „просторових ґрат“ кристала (ч. II).

Рисунок 290 показує рентгенограму, тобто зображення, одержане на фотографічній пластинці від тонкого пучка променів, пропущених через кристал натрій-хлориду. Центральна пляма утворилась від прямолінійного поширення променів; інші плями спричинені промінням, що зазнало дифракції.

Знімки, одержувані з допомогою рентгенового проміння при проходженні його через пластинки різних кристалів, дали можливість створити теорію будови кристалів.

7. Далі, рентгенове проміння сильно *діє фізіологічно*, руйнуючи клітини організмів. На цій властивості засноване їх лікувальне діяння: направляючи рентгенове проміння на якийнебудь хворобливий утвір в тілі, можна спричинити руйнування хво-

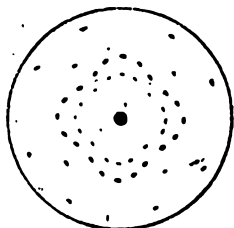


Рис. 290. Рентгенограма кристала натрій-хлориду.

роботворних клітин і вилікування організму. Але те саме фізіологічне діяння променів при непомірному користуванні ними шкідливо впливає на здорові клітини.

220. Будова рентгенової трубки. Найпростіша рентгенова трубка являє собою скляну кулю з впаяними електродами (рис. 291), з якої викачано повітря.

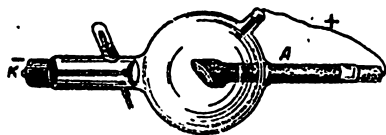


Рис. 291. Рентгенова трубка.

Трубка вмикається в коло вторинної обмотки котушки Румкорфа. Через те що при розряді відбувається розпорошення катода, тобто від нього разом з електронами вилітають і частинки речовини катода, то катод роблять у рентгенівій трубці з найменш розпорошеної речовини — алюмінію. На шляху катодного проміння під кутом до нього поміщається антикатод — платинова пластинка, об яку ударяються електрони при своєму польоті: на ній при раптовому зупиненні електронів виникає випромінювання рентгенового проміння. Для нейтралізації електронів, що попадають на антикатод, він сполучається провідником з анодом. Антикатод сильно нагрі-

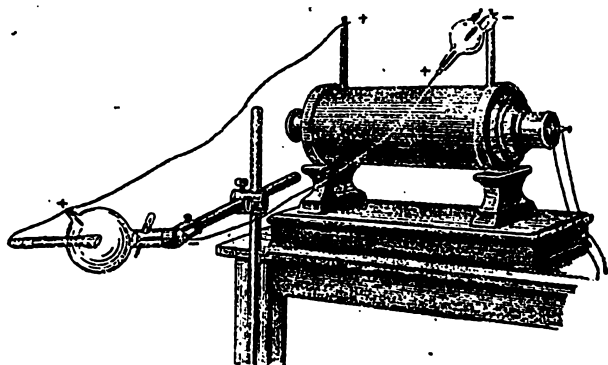


Рис. 292. Установка для рентгенових знімків.

вається від ударів електронів; для його охолодження всередині нього пропускається течія води. Через те що для рентгенових знімків і спостережень потрібен завжди розряд в одному напрямі, а індукційні струми котушки Румкорфа дають змінні струми, то в коло рентгенової трубки вставляється випростувач (рис. 292). Випростувач являє собою таку ж трубку (без антикатода) з такою віддаллю електродів, щоб через газовий проміжок міг проходити розряд тільки від значнішої ЕРС індукції при розмиканні котушки.

Рисунок 293 передає знімок, одержаний з допомогою рентгенового проміння.

Тепер списана вище рентгенова трубка витісняється трубкою Куліджа. Ця трубка являє собою скляний балон, в якому створюється розрідження до  $10^{-6}$  мм рт. ст. В нього впаяна уміщена в металічний циліндр вольфрамова спіраль, розжарювана струмом від спеціального трансформатора. При розжа-

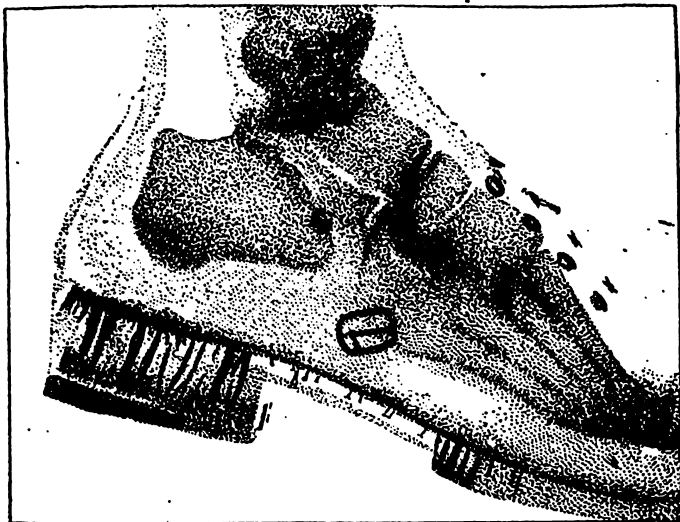


Рис. 293. Рентгенознімок.

ренні спіраль випускає електрони і тому служить катодом. Анодом, який є в той же час і антикатодом, служить вольфрамова або платинова пластинка, впаяна в трубку.

221. Перетворення променистої енергії в інші форми. Промениста енергія, що падає на тіло, розпадається на три частини: одна частина відбивається, друга — вбирається, третя — пропускається.

**Світловий тиск.** Світлова хвиля, що падає на якунебудь тіло, тисне на нього. Існування такого тиску було теоретично визначено Максвеллом в 70-х роках минулого століття.

Експериментально його виміряв знаменитий московський фізик П. М. Лебедев в 1900 р. для твердих тіл і в 1910 р. для газів.

Досліди вимагали внятково високої майстерності, бо світловий тиск виражається дуже малими величинами. Так, чорна поверхня, освітлена перпендикулярним сонячним промінням, зазнає тиску близько  $0,26 \frac{\text{мГ}}{\text{м}^2}$ .

Проте, світловий тиск робить величезний вплив на переміщення найдрібніших частинок речовини у світовому просторі.

Всяка частинка речовини у всесвіті знаходиться під двоюрим впливом з боку найближчого світила: поперше, на неї діє сила притягання світила; по-друге, — сила світлового тиску, яка відштовхує частинку від світила.

Перша пропорціональна масі частинки, отже, пропорціональна її об'ємові, а при сферичній формі частинки пропорціональна кубові радіуса. Друга пропорціональна поверхні, отже, квадратів радіуса.

При зменшенні розміру частинки притягальна сила зменшується швидше, ніж сила відштовхування (бо куб числа меншає швидше, ніж квадрат його при зменшенні самого числа). При роздрібнюванні частинки завжди може вийти такий розмір її, що на даній віддалі від світила відштовхна сила стане більша притягальної. Така частинка понесеться в просторі у бік від світила.

Сонце своїм світловим тиском постійно діє відштовхуюче на частинки, що входять до складу комет. При наближенні до Сонця комети викидають хвіст — потік частинок, відштовхнутих світловим тиском Сонця з тіла комети. Хвостя комет завжди направлені в бік, протилежний Сонцю.

Закономірність утворення кометних хвостів є тисячолітнім підтвердженням лабораторного дослідження, зробленого П. М. Лебедевим.

1. Найзагальнішим результатом в бирання тілом променистої енергії є *виникнення теплової енергії — тіла нагріваються*; так, Земля нагрівається від Сонця.

2. Дуже часто відбувається *перетворення променистої енергії в хімічну*. Грандіозне перетворення променистої енергії в хімічну відбувається в рослинах і полягає в

П. М. Лебедев<sup>1</sup> (1866 — 1912).

перетворенні вуглекислого газу і води в органічні сполуки, менш багаті на кисень. Так, рослини перетворюють сонячну енергію в потенціальну енергію їжі й палива.

В багатьох випадках відбувається зворотний процес — окисація: смоли міняють забарвлення, органічні речовини знебарвлюються (вицвітання тканин, біління полотна).

На світлі суміш хлору й водню сполучається у водень-хлорид; водень-пероксид розкладається на кисень і воду.

3. *Відбуваються молекулярні зміни під впливом променистої енергії*: білий фосфор при освітленні переходить в червоний, аморфний селен — в кристалічний, із зміною його електропровідності.

<sup>1</sup> Лебедев Петро Миколайович народився в Москві в 1866 р. З 1891 р. — спочатку асистент, а потім професор у Московському університеті. Визначні роботи Лебедева: вимірювання світлового тиску на тверді тіла (1900 р.) і на гази (1910 р.), що вимагало надзвичайно високої експериментальної майстерності, і пояснення на основі світлового тиску утворення кометних хвостів. Проводжуючи роботи Герца, Лебедев одержав електромагнітні хвилі малої довжини.

Галоїдні солі срібла після освітлення розкладаються, виділяючи металічне срібло при обробці їх іншими певними речовинами. На цій властивості солей срібла заснована фотографія (§ 175).

4. *Промениста енергія спричиняє люмінесценцію*, тобто свічення без підвищення температури. Так, при освітленні пучком білого світла гас світиться голубуватим світлом; органічна фарба флюоресцеїн — зеленим; спиртовий розчин хлорофілу — червоним.

Кальцій-сульфід так само, як і сірчасті солі деяких інших металів, світиться по закінченні попереднього освітлення його сонячним або штучним білим світлом.

Свічення під час освітлення іншими променями, ніж освітлюючі, називається флюоресценцією<sup>1</sup>; свічення після освітлення — фосфоресценцією<sup>2</sup>.

В усіх випадках люмінесценції тілом випромінюється енергія за рахунок вбраної променистої енергії, при чому випромінювані при люмінесценції хвилі завжди мають більшу довжину, ніж вбрані хвилі, що збуджують люмінесценцію.

Через те що флюоресценцію спричиняють і ультрафіолетові промені, то нею можна користуватися для виявлення ультрафіолетового проміння.

Нагрівання фосфоресціюючого тіла спричиняє спочатку посилення яскравості свічення, але потім швидше зникання його: той самий запас енергії при нагріванні витрачається швидше.

Цією властивістю користуються для виявлення інфрачервоного проміння. На фосфоресціюючий екран кидається на деякий час суцільний спектр. Після віддалення його спостерігається посилення свічення за межами видимого спектра з боку червоних променів. Якщо кинуть сонячний спектр, то під лініями вбирання в інфрачервоній частині екран продовжує світитися і після того, як свічення припиняється в інших місцях.

Таким прийомом можна виявити і лінії вбирання в інфрачервоній частині спектра.

5. *Фотоелектрична дія*. Світлові промені, падаючи на тіло, вибивають з нього електрони. Це явище має назву фотоелектричного ефекту (фотоелектру). Число вибитих електронів залежить від кількості світлової енергії, що падає на тіло, а швидкість їх — від якості променів (довжини хвилі). Такого діяння світла зазнає кожне тіло, незалежно від хімічної природи і фізичного стану.

В наслідок цього металічна пластинка, заряджена негативною електрикою, при освітленні розряджається, втрачаючи свої елек-

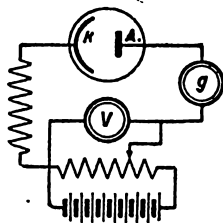


Рис. 294. Фотоелемент з лужним металом.

<sup>1</sup> Флюоресценція — від мінералу флюориту, або плавневого шпату, на якому це явище вперше помітили.

<sup>2</sup> Фосфоресценція — від фосфору, що має здатність світитися, хоча свічення не є фосфоресценцією.

трони. Незаряджена пластинка, втрачаючи при освітленні електрони, заряджається позитивно.

Фотоэффект покладено в основу будови фотоелемента. Фотоелементом називається прилад, що перетворює світлову енергію в електричну. Принцип будови його такий (рис. 294). В балоні, з якого викачано повітря, поміщається пластинка металу *K* (переважно лужного) і металічна сітка *A*. Якщо сполучити *A* і *K* колом і освітити пластинку *K*, то вона посилає свої електрони до сітки *A*, і в колі встановлюється струм, відзначаюваний гальванометром *g*. Величина струму залежить від освітлення.

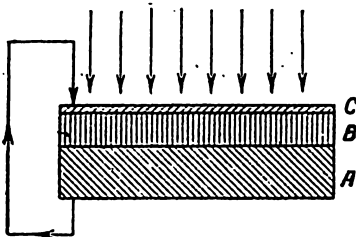


Рис. 295. Фотоелемент з запираючим шаром.

казаній на рисунку установці фотострум буде прямо пропорційний величині світлового потоку, який падає на поверхню катода.

Великого поширення набули так звані купрокснi фотоелементи або фотоелементи з запираючим шаром. Такий фотоелемент складається з трьох накладених одна на одну пластинок (рис. 295).

На пластинку міді *A* накладається шар мідь-оксиду *B*, а на нього наноситься найтонший шар міді, золота або платини *C*.

При освітленні шару чистого металу струм іде від проміжної оксидованої пластинки до зовнішньої і без стороннього джерела.

Фотоелементи дають можливість перетворювати світлову енергію в електричну. В сполученні з електронними підсилювачами фотоелементи входять до складу різних чутливих автоматів, що реагують на зміну інтенсивності: вмикання й вимикання освітлення, керування світловими сигналами, аналіз і сортування домішок, що впливають на прозорість тїл.

Фотоелементи застосовуються в передачі зображень на віддалі і в записі та відтворенні звуку (звукове кіно).

6. Нарешті, треба відзначити фізіологічну дію проміння, головним чином ультрафіолетового.

Якщо різниця потенціалів між електродами настільки велика, що при найбільшому світловому потоку утворюється струм насичення, то при по-

Якщо різниця потенціалів між електродами настільки велика, що при найбільшому світловому потоку утворюється струм насичення, то при по-



О.Г. Столетов<sup>1</sup> (1839—1896).

<sup>1</sup> Столетов Олександр Григорович народився у Владимирі. Після закінчення Московського університету працював у видатних учених Німеччини і Франції. З 1872 р. професор фізики Московського університету і організатор фізичної лабораторії його. Одним із перших вивчив закономірності фотоелектричного ефекту, застосував балістичний гальванометр до вивчення намагнічування.



Це проміння діє руїницьки на клітини організму, спричиняючи ті болісні опіки на шкірі, які утворюються від тривалого діяння сонячного світла<sup>1</sup>.

Руїницьки діючи на клітини, ультрафіолетове проміння вбиває бактерії і припиняє різні хвороботворні утвори в організмі.

На цьому основане його санітарне і лікувальне застосування.

### **Вправа 27.**

1. Як можна взнати про існування ліній вбирання в невидимих частинах спектра ?

2. Що буває з лініями вбирання сонячного спектра під час повного затемнення, коли всі промені, що йдуть від фотосфери, затримуються Місяцем, а Землі досягають тільки промені від атмосфери Сонця ?

3. Як діє на Землі енергія сонячного випромінювання ?

4. Скільки кіньським силам дорівнює потужність сонячної енергії, що падає на 1 м<sup>2</sup> земної поверхні ?

5. Скільки джоулів енергії доставляє Сонце 1 м<sup>2</sup> земної поверхні за годину при перпендикулярному паданні променів ?

6. Яка приблизно температура штучного джерела світла повинна бути найвигіднішою ?

7. Чому сніг не тане при яскравому сонячному освітленні в зимовий день ?

8. Чому проявлення фотографічного знімка робиться при червоному освітленні ?

9. Чи можуть червоні промені спричинити люмінесценцію ?

### **ЗАПИТАННЯ.**

1. Що називається інфрачервоним промінням ? За якою властивістю їх відкрито ? В якому місці спектра вони утворюються ? Які їх показники заломлення і довжини хвиль порівняно з видимим промінням ?

2 Відповісти на такі ж запитання для ультрафіолетового проміння.

3. Які є типи спектрів випускання ?

4. Що називається суцільним спектром ? Коли він утворюється ?

5. Що називається лінійчастим спектром ? Коли він утворюється ?

6. Як можна вивчити розподіл енергії в спектрі ?

7. Який розподіл енергії в сонячному спектрі ?

8. Який розподіл енергії в спектрі штучних джерел світла ?

9. Як змінюється випромінювання з підвищенням температури ?

10. Як називається тіло, що вбирає все проміння, яке падає на нього ?

11. Як називається тіло, що пропускає проміння, яке падає на нього ?

12. Чи однаково прозорість має кожна речовина для різного роду променів ? Навести приклади різної прозорості.

13. Від чого залежить колір прозорих тіл ? Як це дослідити ?

14. Від чого залежить колір непрозорих тіл ? Як це дослідити ?

15. Від чого залежить колір суміші кількох фарб ?

16. Чим відрізняється змішування фарб від змішування спектральних кольорів ?

17. Що називається спектром вбирання ? Коли він утворюється ?

18. Який зв'язок існує між спектрами випускання і вбирання для однієї і тієї ж речовини ?

19. Що називається спектральним аналізом ?

20. З допомогою яких спектрів можна робити спектральний аналіз ?

21. Який прилад застосовується для спектрального аналізу ?

22. Які істотні частини спектроскопа ?

23. Яке значення має спектральний аналіз ?

24. В чому полягає закон Кірхгофа для вбирання й випускання ?

25. Що являє собою сонячний спектр ?

<sup>1</sup> Людський організм захищається від шкідливих утворень під шкірою бурого пігменту, що вбирає промені з поверхневого шару — загар у жителів помірних поясів і темний колір шкіри у жителів жаркого пояса.

26. Що називається фраунгоферовими лініями?
27. Чим пояснюється фраунгоферові лінії?
28. Що можна узяти по фраунгоферових лініях?
29. У що перетворюється вбрана тілом енергія?
30. Навести приклади перетворення промислої енергії в теплову.
31. Дати приклади перетворення промислої енергії в хімічну.
32. Навести приклади фізіологічної дії промислої енергії.
33. В чому полягає люмінесценція?
34. Яке співвідношення існує між довжинами хвиль, вбраних і випусканих при люмінесценції?
35. Які промені сонячного світла переважно дають теплову дію? хімічну? фізіологічну?
36. У чому полягає фотоефект і як він технічно використовується?
37. Яка величина світлового тиску і яке його значення в природі?

222. Поняття про світловий квант. Одним із значних фактів, не пояснюваних хвильовою теорією світла, є згаданий вище фотоефект. Дослід установлює такі закони фотоефекту: 1) величина фотоструму, тобто кількість електронів, що звільняються при опроміненні, прямо пропорційна кількості ввібраної світлової енергії для монохроматичного світла; 2) найбільша швидкість вильоту звільнюваних електронів не залежить від сили світла, а виключно від довжини хвилі його.

Під впливом ультрафіолетового проміння з металу вилітають більш швидкі електрони, ніж під впливом фіолетового; під впливом рентгенівського проміння вилітають ще більш швидкі електрони. Взагалі швидкість фотоелектронів, звільнюваних при освітленні, тим більша, чим менша довжина хвилі, або чим більша частота діючих променів.

Другий закон не можна пояснити з точки зору хвильової теорії; здавалось би, чим більша сила світла, тобто чим більше енергії посилає на освітлювану поверхню джерело світла, тим більша повинна бути енергія вибитих електронів і, отже, їх швидкість.

Ця непримиренна суперечність між теорією і експериментальними даними викликала, як завжди буває в науці, видозміну теорії.

Хвильова теорія поширення світла приводить до вчення про неперервне випускання енергії випромінюючим джерелом. І ось така неперервність не може бути погоджена з незалежністю швидкості електронів від сили світла.

Нова теорія вводить перервність випускання енергії, — випускання енергії окремими порціями певного розміру.

Найменша, неподільна далі кількість енергії, яку може випромінювати, атом, випускаючи світло певної довжини хвилі, дістала назву кванта енергії.

Квант енергії різний для різних довжин випромінюваних хвиль. Основані на дослідях теоретичні дослідження показують, що квант енергії для кожного виду хвиль прямо пропорційнальній частоті коливань.

Якщо позначити частоту коливань через  $\nu$ , квант енергії для хвиль з цією частотою через  $\epsilon$  і множник пропорційності через  $h$ , то квант енергії для кожного виду хвиль виразиться так через частоту:

$$\epsilon = h\nu.$$

Отже, квант енергії випромінювання, посланий збудником коливання, для червоного кольору менший, ніж для фіолетового, для фіолетового менший, ніж для ультрафіолетового, для останнього менший, ніж для рентгенового проміння. Якщо загальна енергія температурного випромінювання для червоного кольору більша, ніж для ультрафіолетового (§ 210), то це буває тому, що загальне число випромінювачів червоного кольору значно більше, ніж випромінювачів фіолетового кольору.

Всі кванти однієї частоти коливання однакові між собою, для різних довжин хвиль вони різні.

Проф. Хвольсон наводить таке порівняння квантів різних довжин хвиль: кванти червоних променів — це потік дрібного дробу; кванти фіолетових променів — потік рушничних куль; кванти променів Рентгена — потік гарматних ядер зростаючого калібру; кванти гама-променів (§ 226) — снаряди облогових гармат. З точки зору квантової теорії другий закон фотоэффекту пояснюється просто: енергія кванта залежить від довжини хвилі; отже, в разі переходу енергії кванта в кінетичну енергію електрона, швидкість електрона також повинна залежати від довжини хвилі.

Необхідність ввести уявлення про кванти викликана не тільки потребою пояснити фотоэффект.

Залежність енергії випромінювання від температури, розглянуту вище в § 211, також не можна було пояснити на основі хвильових уявлень. Всі спроби дати формулу, погоджену з експериментальними даними, на основі неперервності випромінювання енергії, не мали успіху.

В 1900 році німецький учений Планк розв'язав завдання, ввівши уявлення про кванти енергії.

Отже, і енергія, що є однією з характеристик матерії, виявила атомну будову.

Квантова теорія внесла корінну зміну в науковий світогляд.

Основою наукового світогляду в XIX ст. було вчення про еволюцію, про поступову зміну, про неперервність проходження того чи іншого явища, наприклад випускання енергії.

В XX столітті вводиться ідея про квантування, про вибуховість у ході процесу, про стрибкоподібну зміну якостей.

223. Огляд теорій світла. Закінчуючи виклад учіння про світло, розглянемо коротко, як змінювались світлові теорії.

Старогрецька наука вчила, що світло виходить з ока спостерігача.

З часу Ньютона і до двадцятих років XIX століття панувала теорія витікання.

За цією теорією світлові явища спричиняються рухом частинок особливої невагомої матерії. Найдрібніші частинки, або корпускули, цієї матерії вилітають із світлого тіла прямолінійно в усіх напрямках. Попадаючи на сітківку ока, ці частинки спричиняють відчуття світла.

Відбивання на межі двох середовищ, подібне до відбивання пружних куль, пояснювалось відштовхуванням, що його зазна-

вали частинки при наближенні до поверхні. Заломлення приписувалося силам притягання, які діяли на світлову частинку в нафтоншому пограничному шарі між середовищами. Наближення променя до перпендикуляра при переході з середовища з меншою оптичною густиною в середовище з більшою густиною пояснювалося тим, що частинки в середовищі з більшою густиною рухаються з більшою швидкістю, ніж в середовищі з меншою густиною.

Одночасно з теорією виткання виникла і існувала хвильова теорія, створена сучасником Ньютона — Гюйгенсом. За цією теорією світлові явища пояснюються поздовжніми коливаннями, що хвилеподібно поширюються в особливий пружній матерії.

Менша розробленість цієї теорії і високий науковий авторитет Ньютона, з ім'ям якого була зв'язана теорія виткання, відсунули в бік від широкого шляху наукової думки хвильову теорію світла.

Але новоодержувані експериментальні дані не вкладалися в рамки теорії виткання.

Не зважаючи на завзятий захист її прихильників, вона повинна була впасти під натиском нових даних, з яких рішучого удару завдали два факти: просте пояснення Юнгом на підставі хвильової теорії явища інтерференції, яке не можна було пояснити попередньою теорією, і вимірювання Фуко швидкості світла у воді, яка в протилежність ученню теорії виткання виявилась в  $\frac{1}{3}$  разів меншою, ніж в пустоті.

Англієць Юнг і особливо француз Френель (1788 — 1827) відродили в зміненому вигляді хвильову теорію і старанно розробили на основі її пояснення явищ прямолінійного поширення, відбивання, заломлення, інтерференції, дифракції і поляризації. За теорією Френеля світло полягає в поперечному коливанні пружного середовища — ефіру, поширюваному сферичними хвилями від світної точки.

Але в уявленні про властивості пружного середовища, носія світлових явищ, містилась внутрішня суперечність теорії.

Щоб пояснити величезне число коливань у світловій хвилі (наприклад,  $756 \cdot 10^{12}$   $\frac{\text{коливань}}{\text{секунда}}$  для однієї з хвиль фіолетового кольору), треба приписати світлоносному середовищу пружність, що значно перевищує пружність сталі. В той же час рух небесних світил у цьому середовищі без зміни швидкості протягом тисячоліть наукових спостережень, тобто без опору, змушувало вважати те саме середовище таким, що має зникаюче малу густину.

Поєднання надзвичайно великої пружності із зникаюче малою густиною є несумісним для однієї і тієї ж речовини.

Ця суперечність усунена була теорією Максвелла.

В 60-х роках минулого століття Максвелл теоретично довів, що коливання векторів напруженостей електричного і магнітного полів повинні хвилеподібно поширюватися від вібратора. При своєму поширенні електричні й магнітні хвилі повинні поширю-

патися з швидкістю світла, відбиватися, заломлюватися, інтерферувати, дифрагувати, поляризуватися так само, як це відбувається з світловими хвилями. Як відомо, через 20 з лишком років після створення теорії Максвелла, Герц підтвердив експериментально його передбачення.

Крім того, Максвелл установив співвідношення між показником заломлення і діелектричною проникністю речовини.

Ці, а також і інші<sup>2</sup> відомі співвідношення між електричними, магнітними і світловими сталими дали Максвеллові підставу створити електромагнітну теорію світла.

Світлове коливання вже не розглядається як механічне коливання якоїсь пружної речовини.

*Світлові явища спричиняються зміною векторів напруженості електричного і магнітного полів, що мають коливний характер і поширюються в просторі хвилеподібно.*

Тільки у відміну від інших електромагнітних коливань, що сприймаються спеціальними приладами, світлові коливання відбуваються з надзвичайно великими частотами в межах від  $390 \cdot 10^{12}$  до  $763 \cdot 10^{12}$   $\frac{\text{коливань}}{\text{секунда}}$  і сприймаються безпосередньо спеціальним органом людини — оком.

Середовищем, в якому поширюється світло, є той самий ефір, в якому і виявляються й електричне й магнітне поля.

При вміщенні джерела світла в сильне магнітне поле спектральні лінії двояться або трояться, що вказує на зміну довжини хвиль у пучку променів, що без магнітного поля є однорідним (явище, відкрите Зеєманом). При такій же установці електричне поле розкладає спектральну лінію на ряд ліній (явище, відкрите Штарком). З другого боку, ми бачили, що падання на метал потоку світлової енергії спричиняє виділення ним електронів.

Всі ці дані вказують на щільний зв'язок світлових і електромагнітних явищ, підтверджуючи електромагнітну теорію світла.

Нарешті, явище фотоелектру знову викликає до життя вчення про випускання світним тілом особливих частинок — квантів, тобто створення разом з хвильовою і квантової теорії.

Світні тіла випускають кванти в усіх напрямках, і ці кванти переміщуються в середовищі прямолінійно. В цьому відношенні сучасна квантова теорія збігається з старинною ньютонівською теорією витікання.

Наукова думка щодо витікання явищ світла пройшла через цікавий діалектичний процес. Коли теорія витікання наштовхнулася на явище інтерференції або на той факт, що швидкість світла в речовині менша, ніж у пустоті, чого вона не могла пояснити, настало заперечення її. Виникла суперечність була розкрита створенням хвильової теорії. Дані, що суперечать хвильовій теорії, приводять до її заперечення, і це повторне заперечення повертає до теорії випускання, але не в її початковому вигляді, а в переробленому, що

<sup>2</sup> Так, деякі прозорі речовини набувають здатності обертати на якийсь кут площину, в якій відбуваються поперечні світлові коливання, в тому випадку, коли вони знаходяться в магнітному полі. Таке ж обертання площини коливань відбувається при відомванні світлових променів від поверхні намагніченого тіла.

піднявся на вищий ступінь. Через те що квантова теорія не пояснює явищ інтерференції, то теорія світла повинна стати злиттям — синтезом — хвильової і квантової теорій.

**224. Огляд електромагнітних коливань.** З усього попереднього випливає загальний висновок: *всі види променистих коливань є тільки різновидностями електромагнітних коливань.*

Це наукове відкриття розкриває великий принцип діалектичного розвитку природи: єдність основного начала в різноманітності явищ. При цьому кількісна зміна довжини хвилі нерозривно зв'язана з набуванням нової якості: іншого діяння на тіла.

Різні електромагнітні хвилі відрізняються одна від одної способом, яким вони природно або штучно збуджуються, а також засобами, якими вони найпростіше виявляються. Всі вивчені вище коливання можна розподілити за довжинами своїх хвиль в ряд від найдовших хвиль до найкоротших відомих хвиль, складаючи так звану „шкалу“ електромагнітних коливань.

Впис з цієї „шкали“ наводиться в доданій таблиці, при чому в неї включені для повноти і гама-промені, що розглядаються в § 226.

Назва ділянки „шкали“ хвиль	Довжини хвиль	Частота в герцах
1. Низькочастотні хвилі . . . . .	~ — 15 км	0 — $2 \cdot 10^4$
2. Радіохвилі . . . . .	15 км — 1 дм	$2 \cdot 10^4$ — $30 \cdot 10^8$
3. Ультрарадіохвилі . . . . .	10 см — 0,1 мм	$3 \cdot 10^9$ — $3 \cdot 10^{11}$
4. Інфрчервоної хвилі . . . . .	100 $\mu$ — 0,76 $\mu$	$3 \cdot 10^{12}$ — $400 \cdot 10^{12}$
5. Світлові хвилі . . . . .	0,76 $\mu$ — 0,38 $\mu$	$4 \cdot 10^{14}$ — $8 \cdot 10^{14}$
6. Ультрафіолетові хвилі . . . . .	0,38 $\mu$ — 5 м $\mu$	$8 \cdot 10^{14}$ — $6 \cdot 10^{16}$
7. Рентгенові хвилі . . . . .	5 м $\mu$ — 0,004 м $\mu$	$6 \cdot 10^{16}$ — $7,5 \cdot 10^{19}$
8. Гама-хвилі . . . . .	40X — 1X <sup>1</sup>	$7,5 \cdot 10^{19}$ — $3 \cdot 10^{21}$

### III. БУДОВА АТОМА.

**225. Радіоактивність.** Через рік після відкриття рентгенового проміння французький фізик Беккерель в 1896 році помітив, що скло, до складу якого входили солі металу урану, діє через чорний папір на фотографічну пластинку, спричиняє флюоресценцію, розряджає електроскоп, іонізуючи повітря. Через два роки, в 1898 р. французькі учені — Кюрі і його дружина Складовська-Кюрі — відкрили солі невідомого елемента, які мали такі ж властивості, як і метал уран, тільки в незрівняно більшій мірі. Крупишка такої солі розряджала на значній віддалі електроскоп за дуже малий час.

Іонізація газу, діяння на фотографічну пластинку, збудження флюоресценції, — все це нагадувало діяння променів, або потоків заряджених частинок.

<sup>1</sup> X — одиниця довжини, що дорівнює десяти тисячій частині міліметра.

Тому нововідкриті властивості урану і другого елементу, відкритого Кюрі, пояснювались тим, що ці елементи самовільно й безперервно випускають якесь проміння.

Через те що латинською мовою промінь називається словом „радіус“, то здатність елементів самовільно і безперервно випускати потік променів і електрично заряджених частинок дістала назву радіоактивності.

Відкритий ученими Кюрі елемент, згодом виділений Марією Кюрі в чистому вигляді, дістав назву радію.

Приладом для виявлення радіоактивності і вимірювання її ступеня служить заряджений електроскоп.

Крім урану (атомна вага  $A = 238,14$ ) і радію ( $A = 226,97$ ), були відкриті ще радіоактивні елементи (торій  $A = 232,12$ , Кюрі, 1896 р.; актиній  $A = 226$ , Деб'єрн, 1899 р.; полоній  $A = 210$ , Кюрі, 1898 р.).

**226. Склад радіоактивного випромінювання.** Вміщуючи радіоактивну речовину у магнітне поле (рис. 296), можна спостерігати по діянню променів на флюоресціюючу або фотографічну пластинку, що випромінювання розпадається на три потоки. Один потік відхиляється магнітним полем у тому напрямі, який відповідає правилу лівої руки Флеммінга для відхилення електричного струму; другий потік відхиляється в протилежну сторону; третій іде без відхилення.

З напрямом відхилення променів можна було встановити, що радіоактивність полягає у випусканні речовиною трьох видів променів: 1) потік позитивно заряджених частинок, який дістав назву  $\alpha$  (альфа)-променів; 2) потік частинок негативної електрики  $\beta$  (бета)-промені; 3) електромагнітні хвилі —  $\gamma$  (гама)-промені.

Пильні дослідження показують, що  $\alpha$ -промені: 1) відхиляються магнітом так, як і потік позитивної електрики; 2) спричиняють люмінесценцію; 3) іонізують газу; 4) сильно вбираються повітрям та іншими тілами; 5) мають на кожній частинці позитивний заряд, чисельно рівний зарядові двох електронів; 6) мають масу кожної частинки, в 4 рази більшу маси атома водню; 7) своїми властивостями подібні до анодних променів.

Атомна вага, в 4 рази більша, ніж атомна вага водню, вказує на те, що  $\alpha$ -частинка атомною вагою відповідає атому гелію; позитивний заряд у два електрони вказує на відсутність в атомі гелію двох зовнішніх електронів. Отже, кожна  $\alpha$ -частинка є іон гелію.

Через те що  $\alpha$ -частинка — іон гелію — має масу, що значно перевищує масу атома водню, а тим більш масу електрона, то вона може утворитися тільки в наслідок розпаду атомного ядра, в якому зосереджена майже вся маса атома.

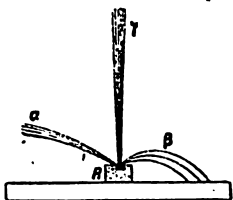


Рис. 296. Відокремлення магнітним полем променів  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  — радіоактивної речовини. Магнітне поле перпендикулярне до площини рисунка.

Дослідження  $\beta$ -променів показує, що вони: 1) відхиляються магнітом, як потік електронів; 2) проникають углиб тіл легше  $\alpha$ -променів; 3) спричиняють люмінесценцію; 4) іонізують гази (слабше, ніж  $\alpha$ -промені); 5) мають швидкість, близьку до швидкості світла; 6) подібні до катодних променів.

Отже,  $\beta$ -промені є потік електронів.

Нарешті  $\gamma$ -промені не відхиляються ні магнітним, ні електричним полем (рис. 296).<sup>1</sup> І є справжніми променями електромагнітних коливань з довжинами хвиль від 0,004 до 0,0001 мр.



Кюрі-Склядовська<sup>1</sup>  
(1867 — 1934).

Найбільша частина всієї енергії, до 99%, припадає на потік  $\alpha$ -частинок. Ця енергія є звільнювана при розпаді внутрішньоатомна енергія, що являє собою ту роботу, яка була затрачена на побудову атома з його складових частин. За рахунок виділеної з радіоактивних елементів енергії підвищується температура самого препарату і повітря, що оточує цей препарат, і виникає свічення навколо нього.

Через те що радіоактивність мають всякі солі радіоактивних елементів, то цю властивість треба приписувати якраз самому атому елементу.

Через те що радіоактивність полягає або у викиданні ядер гелію ( $\alpha$ -промені) або електронів ( $\beta$ -промені), то треба сподіватися перетворення одних радіоактивних елементів в інші.

Всі хімічні елементи відрізняються один від одного, крім різниці в атомній вазі, також величиною позитивного заряду ядра. В таблиці Менделєєва елементи розміщені в 11 стовпчиках так, що при переході від нульового стовпчика до дальшого позитивний заряд ядра збільшується на одиницю.

Викидаючи  $\alpha$ -частинку, ядро втрачає з своєї атомної ваги 4 одиниці і разом з цим 2 позитивних заряди і перетворюється в атомне ядро іншого елементу, що стоїть на 2 стовпчики вліво в менделєєвській системі (див. таблицю в кінці книги). Так уран I ( $A = 238,2$ ) через випускання  $\alpha$ -частинок переходить у новий елемент, названий уран X ( $A = 234$ ). При випусканні  $\beta$ -частинок ядром втрачається один негативний заряд; отже набувається один позитивний заряд, і елемент перетворюється в новий еле-

<sup>1</sup> Кюрі-Склядовська Марія — перша жінка професор в Парижі. Уславилась своїми роботами з радіоактивності. У липні 1898 р. відкрила радіоактивний елемент полоній, в грудні того ж року — радій, пізніше — виділила металічний радій. Вона дала метод виділення радіоактивних елементів, дослідила виділювані ними  $\alpha$ - і  $\beta$ -частинки, вивчила перший продукт розпаду радію — емакцію радію, визначила так звані «сталі» розпаду, які характеризують різні радіоактивні речовини, вяснила незалежність радіоактивного розпаду від зниження температури навіть до дуже низького ступеня. Її ім'ям названа одиниця для вимірювання величини радіоактивної здатності — «кюрі».



мент, що зміщується в системі на один стовпчик. Та відмічено цілі сім'ї елементів, що перетворюються з попередніх у наступні.

Приклад такої сім'ї уран — радій дано в наведеній нижче таблиці. В першому стовпчику її названо самі елементи у послідовному порядку їх утворення. В другому стовпчику дано їх атомні ваги. У третьому стовпчику дано період піврозпаду  $T$ .

Періодом піврозпаду, або половиною життя, називається час, протягом якого розпадається половина початкової кількості даного радіоактивного елемента.

У четвертому стовпчику показано ті частинки, через випускання яких відбувається перетворення одних елементів у наступні.

Елемент	Атомна вага	Період піврозпаду	Випускання частинки
Уран I	238	$5 \cdot 10^9$ років	$\alpha$
Уран $X_1$	234	23,8 дн.	$\beta$
Уран $X_2$	234	1,17 хвил.	$\beta$ $\alpha$ $\gamma$
Уран II	234	$\sim 10^6$ років	$\alpha$
Іоній	230	$9 \cdot 10^4$ років	$\alpha$
Радій	226	1630 років	$\alpha$
Еманация (радон)	222	3,85 дн.	$\alpha$
Радій А	218	3,05 хвил.	$\alpha$
Радій В	214	26,8 хвил.	$\beta$
Радій С	214	19,5 хвил.	$\beta$ $\gamma$
Радій С	214	$1,5 \cdot 10^{-8}$ сек. (?)	$\alpha$
Радій D	210	16 років	$\beta$
Радій E	210	4,85 дня	$\beta$
Радій F (полоній)	210	136 днів	$\alpha$
Свинць	206	—	—

Серед елементів з атомною вагою, рівною атомній вазі свинцю і нижче, природної радіоактивності не спостерігається.

227. Прилади для виявлення  $\alpha$ -частининок. а) Камера Вільсона (рис. 297).

Частинки  $\alpha$ , що вилітають з радіоактивної речовини, завдяки своїй величезній швидкості іонізують повітря. Якщо в повітрі є пересичена водяна пара, то навколо іона конденсуються крапельки вологи. На цій властивості засноване діяння камери Вільсона. Вона являє собою посудину з простором, насиченим водяною парою над водою. В цей простір вводиться радіоактивний елемент. Потім через мале зниження температури створюється пересичення паром, що осідає на іонах, які утворилися на шляхах поширення  $\alpha$ -частинок.

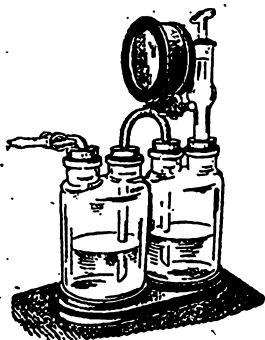


Рис. 297. Камера Вільсона.

При освітленні камери можна бачити і сфотографувати питки краплинок туману, які обрисовують шляхи  $\alpha$ -частинок. Фотографія таких шляхів зображена на рис. 298.

По ній можна і підрахувати частинки, що вилетіли за виміряний час.

б) *Спінтарископ Крукса*. Цей прилад являє собою трубку (рис. 299), в одному кінці якої міститься лупа  $L$ , в другому — фосфоресцюючий екран  $S$ . Всередину трубки, на близькій віддалі від екрана вводиться голка  $R$ , на якій є сліди радіевої солі.

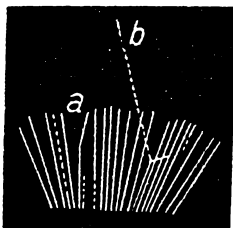


Рис. 298. Траєкторії  $\alpha$ -частинок за фотографією Вільсона.

В темноті спостерігаються окремі спалахи на екрані (сцинтиляції). Кожний спалах відповідає ударові  $\alpha$ -частинки.

Резерфорд і Гейгер підраховали, що 1  $\mu\text{г}$  радію за 1 сек. випускає 136 мільйонів  $\alpha$ -частинок. Якщо спостерігається один спалах за 1 сек., то це означає, що препарат містить

$\frac{1}{136\,000\,000}$   $\mu\text{г}$  радію.

**228. Штучне перетворення елементів.** Одержуючи радіоактивне випускання  $\alpha$ -частинок

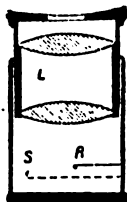


Рис. 299. Спінтарископ Крукса.

у чистому азоті, Резерфорд в 1919 р. міг помітити в ньому появу атомів водню. Пояснення цього явища могло полягати в тому, що швидко летюча  $\alpha$ -частинка, взаємодіючи з ядром атома азоту ( $A=14$ ), вибиває з нього один протон, який у сполученні з електроном дає атом водню. Таким же способом водень одержали з розбивання  $\alpha$ -частинкою атомів бору ( $A=11$ ), фтору ( $A=19$ ), натрію ( $A=23$ ), алюмінію ( $A=27$ ) і фосфору ( $A=31$ ). В усіх випадках виділення водню ударом з атомів інших елементів, атомна вага цих елементів не є числом, кратним 4. Через те що атомна вага гелію дорівнює 4, то звідси очевидно, що будова ядра гелію є дуже стійкою сполукою.

Імовірність зіткнень  $\alpha$ -частинок з атомами азоту дуже мала: на мільйон пролітаючих  $\alpha$ -частинок припадає 20 розщеплених ядер азоту.

В дальших дослідженнях як снарядом для руйнування атомних ядер стали користуватися ядрами водню (протонами), які розганялись силою електричного поля з різницею потенціалів в 1 000 000 вольтів.

Кокрофт і Уолтон в 1932 році, бомбардуючи протонами літій ( $A=7$ ), дістали гелій.

Наступні досліди показали, що майже всі елементи, крім найважчих, при бомбардуванні протонами виділяють  $\alpha$ -частинки, тобто зазнають штучного перетворення. Такі експерименти повторені в Радянському Союзі в Харкові.

**229. Нейтрон.** Боте і Беккер в 1930 році, бомбардуючи  $\alpha$ -частинками елемент берилій, одержали частинки, які прони-

кали на дуже велику віддаль через товщу речовини, наприклад при проходженні через пластинку свинцю в 10 см потік цих частинок зменшувався тільки процентів на 30. З другого боку, ці частинки не іонізували газу в камері Вільсона. Ці властивості можна пояснити тим, що зіткнення цих частинок з ядрами атомів бувають дуже рідко. А це значить, що такі частинки легко проходять без зміни свого напрямку через електричні поля ядер і електронів. Проходити ж без помітної зміни свого напрямку через електричне поле може частинка, яка не несе на собі електричного заряду. Тому зробили висновок, що частинки, нибивані з берилію, нейтральні. На цій підставі вони дістали назву нейтронів. Посереднім способом, за зміною тих швидкостей, які виникають, хоча і від рідких, але які все ж спостерігаються, зіткнень ядер різних елементів з нейтронами, удалось обчислити їх масу.

*Маса нейтрона дорівнює масі протона, заряд дорівнює нулеві.*

230. Космічне проміння. Крім частинок, застосовуваних у фізичних лабораторіях для руйнування ядер, з всесвіту на Землю попадає потік частинок, що летять з надзвичайно великою швидкістю. Якщо захистити заряджений електроскоп від усіх відомих іонізаторів, він все ж розряджається. Це вказує на існування ще якогось надзвичайно сильного іонізатора. Від нього не захищає електроскоп ні дуже товста свинцева броня, ні шар води в 200 м (при підводних експериментах).

Як показали польоти в стратосферу радянських стратонавтів і підняття куль з автоматичними приладами, діяння цього іонізатора посилюється при піднятті в атмосферу.

Ці спостереження привели до висновку, що на Землю попадають з світового простору надзвичайно швидким польотом частинки матерії. Потік частинок із світового простору дістав назву космічного проміння.

Фізики скористувались космічним промінням як снарядом для розщеплення ядер і одержали з їх допомогою ще нові частинки.

231. Позитрон. Андерсен і Блеккет вивчали потік космічного проміння в камері Вільсона і піддавали рухомі частинки, одержані від розщеплення ядер космічним промінням, діянню магнітного поля.

Фотографії (рис. 300) показують відхилення одних частинок в один бік, відхилення інших частинок у протилежний. Значить, нарівні з негативно зарядженими частинками існують частинки позитивно заряджені. Обчислення мас і зарядів цих останніх показало, що маса їх і заряд рівні масі і зарядові електрона.

Частинка з масою, рівною масі електрона, і з позитивним зарядом, чисельно рівним зарядові електрона, дістала назву позитрона.

Наступні дослідження (Чадвіка, Блеккета і Оккіаліні) показали, що виділити позитрони можна також бомбардуванням ядер нейтронами.

232. Будова атомного ядра. Через те що тепер відомо кілька елементарних частинок, то природно поставити питання, з яких частинок складається атомне ядро.

З усіх даних, які мала наука в 1937 р., встановилося уявлення про те, що ядро збудоване тільки з важких частинок — протонів і нейтронів.

233. Штучна радіоактивність. В 1934 р. було відкрито (Ірена Кюрі і Жоліо), що деякі елементи (бор, алюміній, магній) в результаті бомбардування  $\alpha$ -частинками набувають властивості короткочасної<sup>1</sup> радіоактивності.

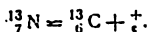
<sup>1</sup> Наприклад, у бору тільки через 14 хвилин спостерігається зменшення випромінювальної здатності вдвоє.



Рис. 300. „Злива“ з частинок — електронів і позитронів.

Процес випускання можна зобразити так. Атомну вагу елементу позначимо числом біля хімічного знака наліво зверху, число зовнішніх електронів і, отже число позитивних зарядів ядра, — числом біля хімічного знака наліво унизу, буквою  $\nu$  позначимо нейтрон, буквою  $\epsilon$  — позитрон.

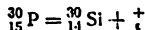
Тоді для бору  ${}^{10}_5\text{B} + {}^4_2\text{He} = {}^{13}_7\text{N} + \frac{1}{0}\nu$ ; але ядро азоту з атомною вагою 13 нестійке і зараз же розпадається:



В результаті розпаду атома бору виникає атом вуглецю<sup>1</sup> з атомною вагою 13 і випромінюються позитрон і нейтрон.

Для алюмінію:  ${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^4_2\text{He} = {}^{30}_{15}\text{P} + \frac{1}{0}\nu$ .

Ядро фосфору з атомною вагою 30 нестійке і розпадається:



Такі ж результати одержали при бомбардуванні вуглецю потужним потоком протонів (Кокрофт).

**234. Будова атома.** Явища подільності тіл, зчеплення, властивостей поверхонь плівки, випаровування, розширення і стискування, тиску газів і пари, дифузії, розсіяння світла в атмосфері і багато інших привели до визнання будови тіл з молекул, які знаходяться в русі, вид якого визначає стан тіл — тверде, рідке, газоподібне.

Явища розчинення, електроліз, проходження електричного струму через гази, дифракція рентгенового проміння в кристалах служать основою вчення про іони — частини молекули, які мають електричні властивості.

Вивчення хімічної будови тіл і їх хімічних перетворень привело до вчення про склад молекул із атомів хімічних елементів.

Радіоактивність природна і штучна приводить до висновку про складну будову атома, до складу якого входять частинки, різні своїми властивостями.

Властивості найпростіших частинок вивчено в анодних і катодних променях, в термоелектронних, фотоелектричних, радіоактивних і інших явищах, що з ними зв'язані і до них зводяться.

Розміщення найпростіших частинок в атомі можна було пояснити головним чином за явищами випромінювання, на основі спектрів хімічних елементів і їх сполук.

Сучасна картина будови атома уявляється в основних рисах в такому вигляді.

Атом складається з окремих складових частин, що несущільно заповнюють об'єм, приписуваний атому. Рисунок 298 зображає шляхи  $\alpha$ -частинок у повітрі. З нього видно, що ці шляхи надзвичайно рідко відхиляються від прямолінійності, хоча кожна частинка на своєму шляху зустрічає близько 100 000 молекул. Очевидно,  $\alpha$ -частинка легко проникає через об'єм атома і тільки в рідких випадках стикається з тією частиною атома, яка здатна відхилити частинку від прямолінійного шляху. Ця частина атома є ядром атома. З рідкості відхилень  $\alpha$ -частинок при численності молекул, що зустрічаються на її шляху, і з інших

<sup>1</sup> Див. § 234.

спостережень можна обчислити, що діаметр ядра лежить в межах від  $10^{-13}$  до  $10^{-12}$  см, тоді як діаметр атома в цілому може досягати  $10^{-8}$  см. Отже, діаметр ядра становить 0,0001 діаметра атома.

Відхиляючий вплив самого ядра і відсутність відхилення від інших частин атома приводять до висновку, що вся маса атома майже цілком зосереджена в ядрі.

Випромінювання при радіоактивному розпаді протилежних своїми властивостями  $\alpha$ - і  $\beta$ -частинок примушує визнати, що той і другий вид найпростіших частинок — і позитивних і негативних — однаково входять до складу атома.

Електрична нейтральність речовини і, отже, атома і порушення її тільки особливими прийомами свідчать, що число позитивних і негативних зарядів в атомі однакове. Негативно зарядженою частинкою є електрон, окреме існування якого виявляється в дуже численних випадках.

Відмінність хімічних взаємодій, особливо відмінність у валентності хімічних елементів, вимагає прийняття різного числа електронів, що входять до складу атомів різних хімічних елементів.

При нейтральності атома повинно бути різне і число позитивних зарядів у атомах різних елементів, але при цьому завжди число позитивних і негативних зарядів у кожному атомі елементу однакове.

Рухливість електронів у металах, термоелектронні явища, потік електронів у електронних трубках, виліт електронів з металу при його опроміненні (тобто при паданні на нього променистої енергії) тощо показують, що електрони легко відокремлюються від атома; отже, природно припустити, що вони розміщуються в зовнішній частині атома.

Позитивні заряди зосереджуються в ядрі.

При рухливості електронів, при малості їх маси порівняно з масою ядра (найменше з усіх атомних ядер — ядро водню — має масу в 1840 раз більшу маси електрона) зовнішні електрони повинні були б притягнутися до супротивно зарядженого ядра і міцно пристати до нього.

Якби справді так було, то електрони не мали б, безперечно, спостережуваної у них рухливості і легкої відокремлюваності від атома, і діаметр ядра не був би в 10 000 раз менший діаметра всього атома.

Знаходження ж притягнутого до ядра електрона на деякій віддалі від ядра можливе тільки в разі обертання електрона навколо ядра. Подібно до цього планети не падають на Сонце, що їх притягає, завдяки тому, що мають деяку швидкість руху по орбіті навколо Сонця.

Досліджуючи закони випромінювання тіл і види спектрів, Б о р в 1913 р. висунув твердження, з яким добре погоджується багато спостережень, що електрон може обертатися не по єдиній орбіті, а може переходити з однієї орбіти на іншу, при чому діаметри цих його орбіт зв'язані певним відношенням з спектральними лініями елементу, тобто з довжинами випромінюваних ним хвиль.

Так, єдиний електрон водню може обертатися по одній із орбіт, радіуси яких мають такі значення:  $r_1 = 0,55 \cdot 10^{-8}$  см;  $r_2 = 2,24 \cdot 10^{-8}$  см;  $r_3 = 5 \cdot 10^{-8}$  см і т. д. (рис. 301).

Причина, через яку електрони знаходяться в стані стійкої рівноваги на одній з цих певних орбіт, невідома.

Яке число обертових електронів властиве кожному хімічному елементові? Сукупність усіх даних привела до того висновку, що число обертових електронів дорівнює номеру елементу у менделєєвській системі елементів. Так, водень ( $N=1$ ) має один електрон, гелій ( $N=2$ ) — два електрони, літій ( $N=3$ ) — три електрони, фтор ( $N=9$ ) — дев'ять електронів, натрій ( $N=11$ ) — одинадцять; хлор ( $N=17$ ) — сімнадцять електронів і уран ( $N=92$ ) — дев'яносто два електрони.

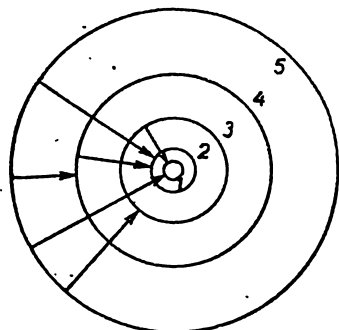


Рис. 301: Можливі орбіти електрона навколо водневого ядра.

Розміщені ці обертові електрони в певному порядку. У гелію два електрони розміщені на одній орбіті.

З літію ( $N=3$ ) починається другий горизонтальний рядок системи Менделєєва до неону ( $N=10$ ). В них зовнішні електрони розміщаються в двох шарах<sup>1</sup>: в першому завжди два, у другому — один у літію, два у берилію ( $N=4$ ), три у бору ( $N=5$ ),

чотири у вуглецю ( $N=6$ ) і вісім у неону ( $N=10$ ). Розрахунки показують, що стійка рівновага взаємодіючих зарядів виникає тоді, коли в одному шарі знаходиться 8 електронів. Дальший зовнішній електрон у натрію вже не може порушити стійкої будови шару з 8 електронів і розташовується на третьому шарі. Всі елементи третього горизонтального рядка системи, починаючи з натрію ( $N=11$ ) і кінчаючи аргоном ( $N=18$ ), мають, крім першого шару з 2 електронами і другого з 8, ще третій, з числом електронів від 1 до 8. В останньому випадку шар знову стає стійким, і далші електрони розміщаються на новому зовнішньому шарі. Отже, при переході від одного горизонтального рядка системи Менделєєва (див. таблицю в кінці книги) до наступного додається по новому шару зовнішніх електронів. Елементи першого вертикального стовпчика системи мають по 1 електрону на крайньому зовнішньому шарі; другого стовпчика — по 2; восьмого стовпчика — по 8. У восьмому стовпчику з повним зовнішнім шаром з 8 електронів знаходяться так звані інертні гази: неон, аргон, криптон, ксенон, які не вступають у

<sup>1</sup> В кожний момент кожний зовнішній електрон має свою орбіту: орбіти електронів — спірси; орбіти електронів лежать у різних площинах. До складу шару, про який говориться в тексті, входить певні числа електронів, подані нижче.

сполуку з іншими тілами; причина цього — в стійкості рівноваги електронів. В сьомому стовпчику знаходяться елементи з 7 електронами на зовнішньому шарі: фтор, хлор, бром, йод, які легко притягають до себе один електрон, в наслідок чого вони легко сполучаються з атомами елементів першого стовпчика з одним електроном на зовнішньому шарі, утворюючи разом з ними стійку молекулу з 8 зовнішніми електронами. Самі по собі елементи першого стовпчика легко втрачають свій зовнішній електрон.

В таблиці Менделєєва елементи розміщені в систему за їх хімічними властивостями. В той же час порядок системи зв'язаний з числом зовнішніх електронів, що обертаються на орбітах. Звідси випливає висновок, підтверджуваний рядом фактів, що хімічні властивості елементів зумовлені числом і розміщенням їх зовнішніх електронів.

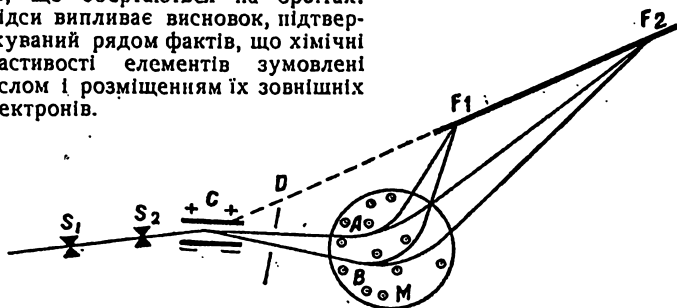


Рис. 302. Схема мас-спектрографа.

Із скількох елементарних частинок складається ядро? Як пояснюються дробові значення атомних ваг багатьох елементів, наприклад у літію 6,94, у хлорі 35,457 тощо?

При природній радіації радіоактивні речовини випускають  $\alpha$ -частинки, що являють собою іон гелію і складаються з двох протонів і двох нейтронів. Ця сполука є дуже міцною сполукою, бо ці частинки в багатьох дослідах служать знаряддям бомбардування інших атомів і вибивають з них ядра водню, самі не зазнаючи руйнування.

Виділення з атомів елементів ядер водню або гелію приводить до думки про те, що ядра всіх елементів могли б бути збудовані з ядер водню. Але якщо атомну вагу водню взяти за одиницю, то при такому припущенні атомні ваги всіх елементів повинні були б виражатися в цілих числах.

Астону вдалося своїми експериментами роз'яснити цю суперечність між двома рядами явищ, користуючись приладом, що називається мас-спектрографом. Уявіть собі, що трубка, в якій утворюються і спостерігаються анодні промені (§ 107), містить хімічний елемент в газо- або пароподібному стані. Тоді іони цього хімічного елементу, що утворюють при своєму русі анодні проміння, можуть мати різні швидкості.

З допомогою двох щілин  $S_1$  і  $S_2$  (рис. 302), вміщених все-

редині тієї ж трубки, з цього потоку іонів можна виділити найтонший пучок. Пропускаючи цей пучок між зарядженими пластинками конденсатора С (всі описувані частини знаходяться всередині тієї ж пустотної трубки), можна діям електричного поля розсіяти цей найтонший пучок, при чому сильніше відхиляються частинки з меншою швидкістю і слабше — з більшою швидкістю.

Нова щільна  $D$  дасть можливість виділити з цього розсіяного пучка ще новий найтонший пучок частинок, які мають приблизно однакову швидкість. Якби всі частинки цього пучка при однаковій швидкості мали і однакову масу, то вони при проходженні через дальше магнітне поле  $M$  всі відхилилися б,



Рис. 303. Спектрограма кріптона.

як одне ціле, і на фотографічній пластинці дали б єдине зображення (пляму). Проте всі спостереження, зроблені над рухом частинок, одержаних від елементів з дробовою атомною вагою, дають завжди кілька плям, принаймні, дві, іноді й більше. Множинність слідів указує на розпад пучка частинок, які рухаються з однаковою швидкістю, на складові частинки, що відхиляються відповідно до маси частинок. За величиною відхилення можна обчислити атомні ваги. Всі такі атомні ваги маємо у вигляді цілих чисел, близьких між собою.

Різновидності елемента, які мають всі хімічні властивості однаковими, але відрізняються атомними вагами, називаються ізотопами. Так, магній з атомною вагою в 24,32 складається з трьох ізоотопів з атомними вагами в 24, 25 і 26. Кріптон, для якого на рисунку 303 дано розміщення плям від його різних частінок (спектрограма), має ізоотопи з числами: 78, 80, 82, 83, 84, 86.

Дробова атомна вага хлору (35,46) пояснюється тим, що до складу реально одержуваного хлору входять його ізоотопи 35 і 37 у відношенні 77 до 23. Те саме має місце і в інших елементах.

Щодо складових частин ядра кожного ізоотопу, то до 1934 р. вчення про ядро вилилось у таку форму. Найпростіше ядро має водень. Воно містить у собі всю масу атома водню, і його електричні властивості відповідають одному елементарному позитивному зарядові, рівному зарядові електрона, але супротивному йому знаком. Ядро водню, як уже зазначалось, дістало назву протона.

Разом з єдиним електроном, що обертається навколо ядра під впливом його притягальної сили, атом водню виявляється нейтральним.

Ізоотоп кожного хімічного елемента містить у своєму ядрі число протонів, рівне номерові елемента в системі Менделєєва. Загальне число протонів і нейтронів у ядрі дорівнює атомній вазі елемента. Так, атом ізоотопу хлору з атомною вагою  $A = 35$



містять у ядрі 17 протонів, 18 нейтронів і поза ядром 17 електронів, розміщених шарами.

Яке ж значення мають знаходження електрона на різних орбітах навколо ядра?

Знаходження електронів на найближчій до ядра орбіті є основним положенням електрона, яке відповідає найменшому запасові потенціальної енергії його відносно ядра.

Перескід з найближчої до ядра орбіти на будьяку віддалену можливий тільки за рахунок одержання енергії ззовні, при чому перескід з кожної орбіти на будьяку більш віддалену вимагає певної кількості енергії. Ці порції променистої енергії, які вбираються електроном при кожному перескоку на більш віддалену орбіту, і є ті кванти енергії, про які було сказано вище. Від величини вбраного кванта залежить, на яку з можливих більш віддалених орбіт відбудеться перескід.

Стан електрона, що перемістився з найближчої на більш віддалену орбіту, називається „збудженим“ станом. Його потенціальна енергія збільшилась за рахунок одержаних ззовні квантів.

Поки електрон обертається по певній орбіті, він не випромінює енергії назовні. Але при всякому зворотному перескоку з однієї з більш віддалених орбіт на попередню, ближчу до ядра, електрон випромінює свій надмір потенціальної енергії, і це випромінювання відбувається у вигляді того ж самого кванта енергії, що був вбраний електроном при переході на більш віддалену орбіту. В цьому полягає пояснення закону випромінювання і вбирання Кірхгофа (§ 216).

Розрахунки квантів енергії і радіусів орбіт відповідають спостереженням спектральних ліній у спектрах елементів.

Цей добре обгрунтований, згідний із спостереженнями, ряд тверджень веде за собою ряд дальших висновків, що вражають своєю несподіваністю.

Квант променистої енергії вбирається і випускається електроном, але поширення променистої енергії зв'язане з хвильовим процесом. Отже, частинка матерії — електрон — сполучається з хвильовим процесом. Звідси виникає припущення, що електрон — частинка речовини — є в той же час і вид хвильового процесу, тобто виникає припущення про двояку природу матерії, яка крім корпускулярного має і хвильовий характер.

Дійсне існування такої двоїстої природи усуває суперечність у витлумаченні світлових явлень як випускання квантів і як поширення хвиль.

Підтвердженням хвильової природи матерії є відкриття дифракції електронів, яке полягає в тому, що вузький пучок електронів, проходячи через металічну пластинку, утворює дифракційні кільця подібно до кілець від світла на покритому шаром волог склі (§ 201).

Дифракція ж, як ми знаємо, зв'язана з хвильовим рухом.

Періодична система хімічних елементів.

Число пера елементу означає його атомний номер, під елементами — атомну вагу.

Група Період	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	1. H Водень 1,0078									2. He Гелій 4,002
2	3. Li Літій 6,940	4. Be Берилій 9,02	5. B Бор 10,82	6. C Вуглець 12,03	7. N Азот 14,008	8. O Кисень 15,9993	9. F Фтор 19,00			10. Ne Неон 20,183
3	11. Na Натрій 22,997	12. Mg Магній 24,32	13. Al Алюміній 26,97	14. Si Силіцій 28,09	15. P Фосфор 31,02	16. S Сірка 32,06	17. Cl Хлор 35,457			18. Ar Аргон 39,944
4	19. K Калій 39,10	20. Ca Кальцій 40,08	21. Sc Скандій 44,96	22. Ti Титан 47,90	23. V Ванадій 50,94	24. Cr Хроми 52,00	25. Mn Манган 54,94	26. Fe Залізо 55,84	27. Co Кобальт 58,91	28. Ni Нікель 58,69
	29. Cu Мідь 63,57	30. Zn Цинк 65,38	31. Ga Галій 69,72	32. Ge Германій 72,60	33. As Арсен 74,93	34. Se Селен 78,92	35. Br Бром 79,916			36. Kr Криптон 83,79
5	37. Rb Рубідій 85,45	38. Sr Стронцій 87,63	39. Y Іттрій 88,92	40. Zr Цирконій 91,22	41. Nb Ніобій 92,91	42. Mo Молибден 95,94	43. Tc Технецій 98,91	44. Ru Рудій 101,7	45. Rh Рейній 102,91	46. Pd Паладій 106,7
	47. Ag Срібло 107,88		49. In Індій 114,8	50. Sn Олово 118,70	51. Sb Стибій 121,76	52. Te Телур 127,6	53. I Йод 126,902			54. Xe Ксенон 131,2
6	55. Cs Цезій 132,81	56. Ba Барій 137,36	57—71 Лантаноїди 81,71	72. Hf Гафній 178,6	73. Ta Тантал 181,4	74. W Вольфрам 183,8	75. Re Рейній 186,2	76. Os Осній 193,8	77. Ir Ірідій 193,1	78. Pt Платина 195,2
	79. Au Золото 197,2	80. Hg Ртуть 200,61	81. Tl Талій 204,39	82. Pb Свинець 207,2	83. Bi Висмут 208,98	84. Po Полоній 209	85. At Астатин			86. Rn Радон 222,0
7	87. Fr Францій	88. Ra Радій 226,97	89. Ac Актиній 227	90—103 Торій і актиноїди	91. Pa Протактиній 231	92. U Уран 238,04				

Елементи від 57 (лантан) до 71 (лоуренцій) дуже схожі між собою властивостями і з групою розташовуються. Вони дають у такому порядку: лантан, церій, протактиній, неозимій, італій, самарій, ербій, гадоліній, тербій, диспрозій, гелмій, ербій, тулій, іттервій і лютецій.

## ЗМІСТ.

### ЕЛЕКТРИКА. Вступ . . . . . 3

#### I. Електричне поле.

1. Електризація тертям . . . . .	3
2. Одночасна електризація обох натираних тіл . . . . .	4
3. Електризація через дотик до зарядженого тіла . . . . .	5
4. Електропровідність . . . . .	5
5. Взаємодія наелектризованих тіл. Електроскоп . . . . .	6
6. Закон Кулона для взаємодії наелектризованих тіл . . . . .	7
7. Електростатична одиниця кількості електрики в системі CGS . . . . .	8
8. Електроізна теорія і пояснення електризації при терті . . . . .	9
9. Розподіл електрики на непровіднику і ізолюваному провіднику . . . . .	10
10. Електрична густина . . . . .	10
11. Електричне поле. Напруженість. Силові лінії . . . . .	12
12. Потенціал . . . . .	14
13. Одиниці потенціала . . . . .	17
14. Поверхні рівного потенціала в полі, утвореному точковим зарядом . . . . .	18
15. Робота переміщення заряду між еквіпотенціальними поверхнями . . . . .	18
16. Еквіпотенціальні поверхні в полі будьяких зарядів . . . . .	18
17. Електрометр . . . . .	19
18. Поверхня нульового потенціала . . . . .	20
19. Перехід електрики з одного провідника на другий залежить від їх потенціалів . . . . .	20
20. Електростатична індукція . . . . .	21
21. Наслідки з явища індукції . . . . .	24
22. Електрофор . . . . .	25
23. Електрична машина . . . . .	26
24. Електроємність . . . . .	27
25. Одиниця електроємності . . . . .	28
26. Залежність електроємності провідника від сусідства інших провідників . . . . .	29
27. Конденсатор . . . . .	29
28. Батарея конденсаторів . . . . .	31
29. Градування електрометра . . . . .	32
<b>II. Закони електричного струму.</b>	
30. Поняття про електричний струм . . . . .	34
31. Хімічний спосіб електризації . . . . .	36
32. Хімічні джерела струму . . . . .	38
33. Електричне коло і напрям струму . . . . .	39
34. Величина струму . . . . .	40
35. Одиниця величини струму . . . . .	40
36. Постійність величини струму в усіх перерізах кола . . . . .	41

37. Опір провідника . . . . .	41
38. Закон опору провідника . . . . .	42
39. Питомий опір речовини . . . . .	42
40. Формула опору провідника . . . . .	43
41. Надпровідність . . . . .	44
42. Зв'язок електропровідності з теплопровідністю . . . . .	45
43. Внутрішній опір джерела струму . . . . .	45
44. Реостат . . . . .	45
45. Закон Ома . . . . .	47
46. Розподіл напруги по різних ділянках кола . . . . .	49
47. Послідовне сполучення провідників . . . . .	52
48. Паралельне сполучення провідників . . . . .	53
49. Розподіл струму між паралельними провідниками . . . . .	55
50. Ламповий реостат . . . . .	56
51. Батарея . . . . .	57
52. Внутрішній опір батареї . . . . .	58
53. ЕРС батареї . . . . .	59
54. Найвигідніше сполучення елементів у батарею . . . . .	59
55. Визначення опору містком Уїгстона . . . . .	60
56. Енергія і потужність струму . . . . .	63
57. Перетворення електричної енергії в теплову . . . . .	64
58. Лабораторна робота 1. Виведення із спроби закону теплової дії струму . . . . .	64
59. Закон Джоуля - Ленца для теплової дії струму . . . . .	65
60. Лабораторна робота 2. Визначення теплового еквівалента електричної енергії . . . . .	66
61. Теплові ампер-вольтметри . . . . .	68
62. Термоелектрика . . . . .	68
63. Термоелектричний термометр . . . . .	69
64. Вольтова дуга . . . . .	69
65. Електричні печі . . . . .	71
66. Дюгові печі . . . . .	71
67. Електричне зварювання . . . . .	72
68. Електричні термометри . . . . .	73

#### III. Магнітне поле.

69. Магнітна дія струму . . . . .	74
70. Основні властивості постійних магнітів . . . . .	74
71. Закон Кулона для взаємодії полюсів . . . . .	76
72. Одиниця магнітної маси . . . . .	77
73. Магнітне поле. Напруженість поля . . . . .	77
74. Силові лінії магнітного поля . . . . .	78
75. Магнітна індукція . . . . .	81
76. Порівняння силових ліній магнітного і електричного полів . . . . .	83
77. Земний магнетизм . . . . .	83
78. Магнітні аномалії . . . . .	85
79. Дослід Ерстед . . . . .	86

80.	Магнітне поле струму . . . . .	86
81.	Електромагніт . . . . .	90
81а.	Мікрофон і телефон . . . . .	90
82.	Дія магнітного поля на рухомий струм. Правило Флеммінга	92
83.	Взаємодія струмів . . . . .	93
84.	Гіпотеза Ампера про походження магнетизму . . . . .	94
85.	Електричні виміри прилади	97

#### IV. Електричний струм через рідини й гази.

86.	Електричний струм через рідини . . . . .	100
87.	Вторинні реакції при електролізі . . . . .	102
88.	Лабораторна робота 3. Вивчення законів електролізу	103
89.	Закони Фарадея для електролізу . . . . .	104
90.	Числове значення заряду електрона в кулонах . . . . .	105
91.	Поляризація елементів . . . . .	108
92.	Елементи, що не поляризуються . . . . .	108
93.	Поляризація електродів . . . . .	111
94.	Акумулятори . . . . .	111
95.	Ємність акумулятора . . . . .	112
96.	Коефіцієнт корисної дії акумулятора . . . . .	113
97.	Застосування акумулятора	113
98.	Технічні застосування електролізу . . . . .	114
99.	Електрометалургія . . . . .	116
100.	Електропровідність газу . . . . .	117
101.	Залежність між величиною струму в газі і різницею потенціалів . . . . .	118
102.	Іонізація ударом . . . . .	120
103.	Розряд у газах при атмосферному тиску . . . . .	120
104.	Блискавка . . . . .	122
105.	Розряд у розріджених газах	122
106.	Катодне проміння . . . . .	123
107.	Анодне проміння . . . . .	125
108.	Термоелектронний струм . . . . .	126

#### V. Електромагнітна індукція.

109.	Умова виникнення і величина ЕРС індукції . . . . .	127
110.	Правило Флеммінга для напрямку індукційного струму	131
111.	Лабораторна робота 4. Введення законів індукції струмів . . . . .	131
112.	Правило Ленца для електромагнітної індукції . . . . .	134
113.	Індукція в суцільних тілах . . . . .	135
114.	Самоіндукція . . . . .	135
115.	Індукційний генератор . . . . .	139
116.	Лабораторна робота 5. Спостереження індукційних струмів у витках дроту, що обертаються в однорідному магнітному полі . . . . .	139

117.	Індукція струму в якорі . . . . .	140
118.	Якір . . . . .	142
119.	Генератори змінного струму	143
120.	Машини постійного струму	143
121.	Динамомашини . . . . .	145
122.	Коефіцієнт корисної дії динамомашини . . . . .	146
123.	Багатополосні машини . . . . .	147
124.	Магнето . . . . .	148
125.	Електромотори . . . . .	150
126.	Електромотор постійного струму . . . . .	151
127.	Зміна напрямку обертання якоря мотора . . . . .	152
128.	Коефіцієнт корисної дії електромоторів . . . . .	152

#### VI. Змінний електричний струм.

129.	Синусоїдальна зміна ЕРС при обертанні витка в однорідному магнітному полі . . . . .	153
130.	Передача електричної енергії на віддалі . . . . .	154
131.	Трансформатор змінного струму . . . . .	155
132.	Електрифікація країни . . . . .	157
133.	Дніпровська гідростанція . . . . .	158
134.	Індукційна котушка Румкорфа . . . . .	160

#### VII. Електромагнітні коливання.

135.	Розряд лейденської банки . . . . .	162
136.	Коливний контур і період коливання . . . . .	164
137.	Електромагнітні коливання . . . . .	164
138.	Електромагнітні хвилі . . . . .	165
139.	Експериментальне дослідження електромагнітних хвиль . . . . .	167
140.	Радіопередача . . . . .	169
141.	Електронна лампа . . . . .	169
142.	Будова антени . . . . .	170
143.	Радіотелеграф . . . . .	171
144.	Приєм телеграфування на слух . . . . .	172
145.	Кристалічний детектор . . . . .	173
146.	Радіотелефонія . . . . .	174
147.	Телемеханіка і телебачення	175
<b>ОПТИКА. Вступ . . . . .</b>		<b>176</b>

#### I. Поширення світла.

148.	Поширення світла в однорідному середовищі . . . . .	177
149.	Світлові явища на межі двох середовищ . . . . .	177
150.	Зображення в плоскому дзеркалі . . . . .	178
151.	Лабораторна робота 6. Дослідження законів заломлення світла . . . . .	179
152.	Закони заломлення світла	180
153.	Повне внутрішнє відбивання	182
154.	Хід променя через пластинку з паралельними гранями . . . . .	183
155.	Хід променя через призму	184

156.	Швидкість світла . . . . .	185
157.	Джерела світла . . . . .	187
158.	Міжнародна свічка. Люмен . . . . .	188
159.	Освітленість . . . . .	189
160.	Одиниця освітленості і формула освітленості . . . . .	190
161.	Вимірювання сили світла джерела . . . . .	192
162.	Фотометр . . . . .	193
163.	Лабораторна робота 7. Порівняння сил світла двох джерел . . . . .	193
161.	Керування ходом світлових променів . . . . .	194
165.	Формула сферичного дзеркала . . . . .	195
166.	Побудова зображення в сферичному дзеркалі . . . . .	196
167.	Сферичні лінзи . . . . .	199
168.	Формула лінзи . . . . .	200
169.	Збільшення зображення . . . . .	201
170.	Зображення в лінзі при різних віддалях предмета від неї . . . . .	201
171.	Лабораторна робота 8. Експериментальне вивчення властивостей лінз . . . . .	204
172.	Оптична сила лінз . . . . .	205
173.	Проекційний ліхтар . . . . .	206
174.	Фотографічний апарат . . . . .	207
175.	Одержання знімка . . . . .	208
176.	Кінематограф . . . . .	209
177.	Сферична аберация . . . . .	210
178.	Хроматична аберация . . . . .	210
179.	Око як оптичний апарат . . . . .	211
180.	Короткозорість і далекозорість . . . . .	213
181.	Умови виразного бачення. Кут зору . . . . .	214
182.	Зір обома очима . . . . .	215
183.	Судження про величину і віддаленість предметів . . . . .	216
184.	Тривалість зорового враження . . . . .	216
185.	Стомлення ока . . . . .	216
186.	Сприймання кольорів . . . . .	216
187.	Чутливість ока до різних кольорів . . . . .	217
188.	Колірне стомлення . . . . .	217
189.	Ірадіація . . . . .	217
190.	Призначення оптичних приладів . . . . .	217
191.	Мікроскоп . . . . .	218
192.	Телескоп . . . . .	219

## II. Природа світла.

193.	Інтерференція світла . . . . .	222
194.	Світлова хвиля. Промінь . . . . .	223
195.	Пояснення інтерференції світла . . . . .	224
196.	Поляризація світла . . . . .	225
197.	Поляризація світла при заломленні . . . . .	227

198.	Принцип Гюйгенса . . . . .	227
199.	Пояснення відбивання і заломлення світла хвильовою теорією . . . . .	228
200.	Пояснення прямолінійного поширення світла за хвильовою теорією . . . . .	229
201.	Дифракція світла . . . . .	230
202.	Вимірювання довжини світлової хвилі з допомогою дифракції . . . . .	232
203.	Дисперсія білого світла на межі двох середовищ . . . . .	234
204.	Кожний спектральний промінь — простий . . . . .	235
205.	Синтез білого світла . . . . .	235
206.	Додаткові кольори . . . . .	236
207.	Складання спектральних кольорів . . . . .	236
208.	Невидимі промені, випромінювані розжареними тілами . . . . .	237
209.	Тіпи спектрів випускання . . . . .	238
210.	Залежність випромінювання від температури . . . . .	240
211.	Зміна випромінювання з температурою . . . . .	242
212.	Поширення в середовищах невидимих випромінювань . . . . .	243
213.	Прозорість тіл . . . . .	243
214.	Змішування фарб . . . . .	245
215.	Спектр вбирання променів розжареною парою . . . . .	246
216.	Закон Кірхгофа для вбирання й випускання . . . . .	246
217.	Спектральний аналіз . . . . .	247
218.	Спектр Сонця та інших світил . . . . .	248
219.	Рентгенове проміння . . . . .	249
220.	Будова рентгенової трубки . . . . .	251
221.	Перетворення променистої енергії в інші форми . . . . .	252
222.	Поняття про світловий квант . . . . .	257
223.	Огляд теорії світла . . . . .	258
224.	Огляд електромагнітних коливань . . . . .	261

## III. Будова атома.

225.	Радіоактивність . . . . .	261
226.	Склад радіоактивного випромінювання . . . . .	262
227.	Прилади для виявлення $\alpha$ -частинок . . . . .	264
228.	Штучне перетворення елементів . . . . .	265
229.	Нейтрон . . . . .	265
230.	Космічне проміння . . . . .	266
231.	Позитрон . . . . .	266
232.	Будова атомного ядра . . . . .	266
233.	Штучна радіоактивність . . . . .	266
234.	Будова атома . . . . .	267

