

## § 6. ДІЕЛЕКТРИКИ В ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОМУ ПОЛІ. ПОЛЯРИЗАЦІЯ ДІЕЛЕКТРИКІВ



Формулюючи закон Кулона або одержуючи вирази для розрахунку напруженостей електростатичних полів, створених різними зарядженими тілами, ми щоразу зазначали, що тіла розташовані у вакуумі. Неважко здогадатися, що речовина, внесена в електростатичне поле, може не тільки суттєво змінити його, але й навіть знищити. Так, власне, й відбувається в металевих провідниках. Проте існують речовини, які не є провідниками, — їх М. Фарадей назвав *діелектриками*. Із цього параграфу ви дізнаєтесь, як поле впливає на діелектрик і як діелектрик впливає на поле.



### Якими є особливості внутрішньої будови діелектриків

*Діелектриками називають речовини, які погано проводять електричний струм:* за звичайних умов в них практично відсутні заряди, що можуть вільно пересуватися. Залежно від хімічної будови діелектрики поділяють на три такі групи.



**Рис. 6.1.** Схематичне зображення неполярного атома. За відсутності зовнішнього електростатичного поля електронна хмара розташована симетрично відносно атомного ядра

1. *Неполярні діелектрики — речовини, молекули (атоми) яких неполярні:* у них за відсутності зовнішнього електростатичного поля центри мас позитивних і негативних зарядів збігаються (рис. 6.1). Типовими прикладами таких речовин є одноатомні інертні гази (аргон, ксенон); гази, що складаються із симетричних двоатомних молекул (кисень, водень, азот); деякі органічні рідини (олії, бензини); з твердих тіл — пластмаси.

2. *Полярні діелектрики — речовини, молекули яких полярні:* у них за відсутності зовнішнього електростатичного поля центри мас позитивних і негативних зарядів не збігаються, тобто електронні хмари в молекулах зміщені до одного з атомів. Прикладом полярного діелектрика є вода ( $\text{H}_2\text{O}$ ), у молекул якої

електронні хмари зсунуті до атома Оксигену. Молекули води (рис. 6.2), як і молекули інших полярних діелектриків, являють собою мікроскопічні *електричні диполі*.

**Електричний диполь** — електронейтральна сукупність двох зарядів, рівних за модулем і протилежних за знаком, розташованих на деякій відстані один від одного (рис. 6.3).

За відсутності зовнішнього електростатичного поля дипольні молекули завдяки тепловому руху розташовуються безладно. Тому геометрична сума напруженостей полів, які створені дипольними молекулами діелектрика, дорівнює нулю.

3. *Йонні діелектрики* — речовини, які мають йонну структуру. Серед них солі та луги: натрій хлорид ( $\text{NaCl}$ ), калій хлорид ( $\text{KCl}$ ) тощо. Кристалічні ґратки багатьох йонних діелектриків можна розглядати як такі, що складаються з двох вставлених одна в одну підґраток, кожна з яких утворена йонами одного знака. За відсутності зовнішнього поля кожна комірка кристала і кристал у цілому є електронейтральними.

## 2 Як електростатичне поле впливає на діелектрик

Внесення діелектрика в зовнішнє електростатичне поле спричиняє *поляризацію діелектрика*. Механізми поляризації різних типів діелектриків різні, оскільки визначаються характером хімічного зв'язку в діелектриках.

Розглянемо випадки поляризації *однорідного діелектрика в однорідному електростатичному полі*. Якщо йдеться про поляризацію неоднорідного діелектрика або про неоднорідне поле, задача ускладнюється і її розгляд виходить за рамки курсу фізики 11-го класу.

У процесі поляризації *неполярних* діелектриків виявляється *електронний (деформаційний) механізм*. Під дією зовнішнього електростатичного поля молекули неполярних діелектриків поляризуються: позитивні заряди зміщуються в напрямку вектора напруженості  $\vec{E}_0$  цього поля, а негативні — у протилежному напрямку (рис. 6.4, а). Зрештою молекули перетворюються

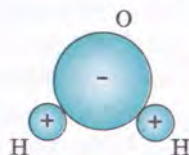


Рис. 6.2. Схематичне зображення молекули води — полярної молекули



Рис. 6.3. Електричний диполь — модель полярної молекули

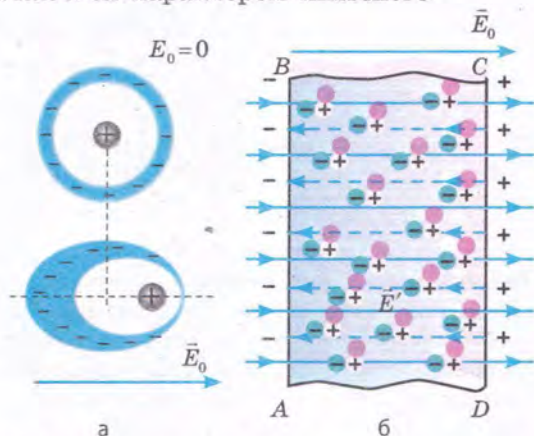
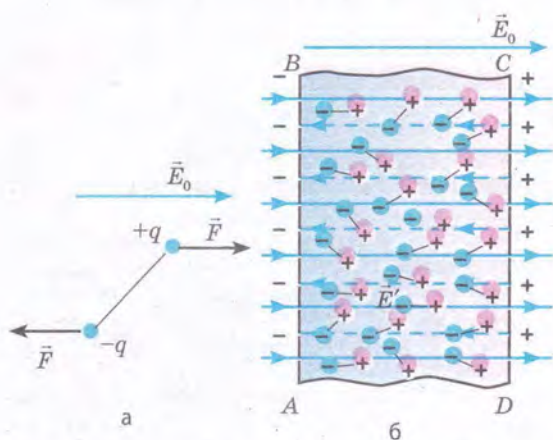


Рис. 6.4. Неполярний діелектрик в електростатичному полі напруженості  $\vec{E}_0$ . Унаслідок поляризації молекули неполярного діелектрика перетворюються на диполі, осі яких розташовані вздовж ліній напруженості  $\vec{E}_0$  (а). У результаті на поверхнях  $AB$  і  $CD$  з'являються зв'язані заряди, що утворюють своє поле — напруженість  $\vec{E}'$  (б)



на електричні диполі, розташовані ланцюжками вздовж силових ліній зовнішнього поля. У результаті на поверхнях  $AB$  і  $CD$  з'являються некомпенсовані зв'язані\* заряди протилежних знаків, що утворюють своє поле, напруженість  $\vec{E}'$  якого напрямлена назустріч напруженості  $\vec{E}_0$  зовнішнього поля (рис. 6.4, б).

У процесі поляризації *полярних* діелектриків виникає *орієнтаційна поляризація*. Під дією зовнішнього електричного поля дипольні молекули діелектрика намагаються повернутися так, щоб їхні осі були розташовані вздовж силових ліній поля. Проте тепловий рух молекул, який відіграє роль дезорієнтаційного чинника, перешкоджає цьому процесу. Тому виникає лише часткове впорядкування дипольних молекул (рис. 6.5), ступінь якого зростає зі збільшенням напруженості  $\vec{E}_0$  зовнішнього поля та зі зменшенням температури діелектрика. Наявність упорядкування в розташуванні молекул приводить до того, що на поверхнях  $AB$  і  $CD$  з'являються некомпенсовані зв'язані заряди протилежних знаків. Ці заряди утворюють своє поле напруженістю  $\vec{E}'$ , напрямом якої протилежний напрямку напруженості  $\vec{E}_0$  зовнішнього поля.



**Рис. 6.5.** Полярний діелектрик в електростатичному полі напруженістю  $\vec{E}_0$ . З боку поля на кожну дипольну молекулу діє пара сил — вони створюють момент сил, який орієнтує хаотично розташовані молекули, повертаючи їх уздовж ліній напруженості  $\vec{E}_0$  (а). У результаті на поверхнях  $AB$  і  $CD$  з'являються зв'язані заряди, які утворюють своє поле — напруженістю  $\vec{E}'$  (б)

Зауважимо, що в полярних діелектриках наявний і електронний механізм поляризації, тобто під дією електричного поля відбувається зсув зарядів у молекулах. Однак ефект орієнтації на кілька порядків перевершує електронний ефект, тому останнім часто нехтують.

У процесі поляризації *йонних* діелектриків спостерігається *йонна поляризація*. Унаслідок дії зовнішнього поля йони різних знаків, що складають дві підґратки, зміщуються в протилежних напрямках, від чого на гранях кристала з'являються некомпенсовані зв'язані заряди, тобто кристал поляризується.

Слід підкреслити, що йонна поляризація в чистому вигляді не спостерігається, — її завжди супроводжує електронна поляризація.

\* Зв'язані заряди отримали таку назву тому, що вони являють собою різноіменні заряди, які входять до складу атома (або молекули) і які за звичайних умов під дією електричного поля не можуть переміщатися незалежно один від одного.



Підсумовуючи, *поляризацію діелектрика* можна визначити як процес появи орієнтованих диполів або орієнтації диполів, які вже існують у діелектрику, під дією зовнішнього електростатичного поля.

У цьому та попередньому параграфі було викладено особливості поведінки провідників і діелектриків в електростатичному полі, однак ними не обмежується все різноманіття речовин. Зараз є зрозумілим, що прогрес і розвиток низки галузей науки та техніки неможливо уявити без розвитку досліджень у галузі *рідких кристалів*. Найхарактерніша властивість цих речовин — здатність змінювати орієнтацію молекул, тобто оптичної осі, під впливом електричного поля, і це відкриває широкі можливості застосування рідких кристалів для створення дисплеїв, індикаторів тощо.\*

### 3 Як діелектрик впливає на електростатичне поле

Розглядаючи різні механізми поляризації діелектриків, ви переконалися, що внесення діелектричного зразка в зовнішнє електростатичне поле спричиняє появу зв'язаних зарядів на поверхні зразка. Зв'язані заряди створюють електричне поле напруженістю  $\vec{E}'$ , яка всередині діелектрика напрямлена протилежно вектору напруженості  $\vec{E}_0$  зовнішнього поля. Через це поле всередині діелектрика слабшає. У результаті напруженість  $\vec{E}$  результуючого поля всередині діелектрика виявляється за модулем меншою, ніж напруженість  $\vec{E}_0$  зовнішнього поля:  $E = E_0 - E'$ . Зменшення модуля напруженості  $\vec{E}$  електростатичного поля в речовині порівняно з модулем напруженості  $\vec{E}_0$  електростатичного поля у вакуумі характеризується фізичною величиною, яку називають *діелектрична проникність  $\epsilon$  речовини*:

$$\epsilon = \frac{E_0}{E}$$

Значення діелектричної проникності різних речовин можуть відрізнятися одне від одного в десятки разів. Так, значення діелектричної проникності газів близьке до одиниці, рідких і твердих неполярних діелектриків — до кількох одиниць (для гасу  $\epsilon = 2$ ), полярних діелектриків — до кількох десятків одиниць (для води  $\epsilon = 81$ ). Є речовини, діелектрична проникність яких становить значення порядку десятків і сотень тисяч (ці речовини називаються *сегнетоелектриками*).

Зменшення напруженості електричного поля в діелектрику в  $\epsilon$  разів порівняно з напруженістю поля у вакуумі\* веде до такого самого зменшення сили електростатичної взаємодії точкових зарядів

\* Якщо бути точними, твердження про те, що діелектрик завжди зменшує напруженість електростатичного поля, в якому він розташований, в  $\epsilon$  разів, є не завжди правильним, — воно справджується тільки для випадків, коли силові лінії зовнішнього поля перпендикулярні до меж тіла або ці межі так далеко, що полем поляризаційних зарядів можна знехтувати.



у цьому діелектрику. Тому закон Кулона для випадку взаємодії двох електричних зарядів, які мають значення  $q_1$  і  $q_2$  і розташовані в діелектрику на відстані  $r$  один від одного, має вигляд:

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon r^2}.$$

Так само змінюються формули для розрахунку потенціалу  $\phi$  і напруженості  $\vec{E}$  поля, створеного точковим зарядом  $Q$ , розташованим у діелектрику:  $E = k \frac{|Q|}{\epsilon r^2}$ ,  $\phi = k \frac{Q}{\epsilon r}$ , де  $r$  — відстань від заряду до точки, в якій розраховується напруженість або потенціал поля.



## Підбиваємо підсумки

Діелектриками називають речовини, які погано проводять електричний струм. Залежно від хімічної будови діелектрики поділяють на три групи: неполярні діелектрики ( $H_2$ ,  $O_2$ ), полярні діелектрики ( $H_2O$ ,  $H_2S$ ), йонні діелектрики ( $NaCl$ ,  $KCl$ ).

Молекула полярних діелектриків являє собою електричний диполь — нейтральну сукупність двох зарядів, які рівні за модулем, протилежні за знаком і розташовані на певній відстані один від одного.

Внесення діелектрика в зовнішнє електростатичне поле викликає поляризацію діелектрика. Поляризований діелектрик створює власне поле, яке ослаблює дію зовнішнього поля всередині діелектрика. Зменшення модуля напруженості  $\vec{E}$  електростатичного поля в речовині порівняно з модулем напруженості  $\vec{E}_0$  електростатичного поля у вакуумі характеризується діелектричною проникністю речовини:  $\epsilon = \frac{E_0}{E}$ .

Закон Кулона для випадку взаємодії точкових електричних зарядів у діелектрику:  $F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon r^2}$ .



## Контрольні запитання

1. Які речовини називаються діелектриками? Наведіть приклади.
2. Чим відрізняються полярні діелектрики від неполярних?
3. Що називають електричним диполем?
4. Чому незаряджені тіла, виготовлені з діелектрика, притягуються до заряджених тіл?
5. Що називають поляризацією діелектрика? Якими є її механізми?
6. Що характеризує діелектрична проникність речовини?



## Вправа № 6

1. Дві маленькі кульки, заряди яких однакові за модулем, перебуваючи в трансформаторному мастилі на відстані 50 см одна від одної, взаємодіють із силою 2,2 мН. Визначте модуль заряду кожної кульки. Діелектрична проникність трансформаторного мастила 2,2.
2. Над кондуктором зарядженого електрометра розташували незаряджену пластину з оргскла. Як зміниться після цього відхилення стрілки електрометра? Відповідь обґрунтуйте.
3. Чи зміняться результати досліду, зображеного на рис. 5.2, якщо циліндри будуть виготовлені з діелектрика? Відповідь обґрунтуйте.

4. Заряджена металева кулька масою 40 г і об'ємом  $4,2 \text{ см}^3$  міститься в посудині з мастилом. Після того як систему помістили в однорідне електростатичне поле напруженістю  $4,0 \text{ МВ/м}$ , кулька спливла, у результаті опинившись на іншій глибині. Знайдіть значення заряду кульки. Густина мастила  $800 \text{ кг/м}^3$ , діелектрична проникність — 5.
- ★ 5. Металева кулька, яка має радіус  $R_1$  і заряд  $q$ , оточена сферичним шаром діелектрика з діелектричною проникністю  $\epsilon$ . Внутрішній радіус діелектрика дорівнює  $R_1$ , зовнішній —  $R_2$ . Визначте зв'язані заряди, наведені на поверхнях сферичного шару.