

## Лекция №2. Электр сыйымдылық. Диэлектриктердегі электр өрісі. Электр өрісінің энергиясы

2.1 Электр өрісіндегі өткізгіштер.

2.2 Оқшауланған өткізгіштің сыйымдылығы. Конденсатор, олардың сыйымдылығы және конденсаторлардың жалғануы.

2.3 Диэлектриктердегі электр өрісі. Байлаулы зарядтар. Полярлы және полярлы емес молекулалар.

2.4 Диэлектриктің поляризациясы. Поляризация векторы.

2.5 Диэлектриктегі электр өрісінің кернеулігі. Ығысу векторы. Диэлектрик өрісі үшін Остроградский-Гаусс теоремасы.

2.6 Сегнетоэлектриктер. Пьезоэлектрлік эффект.

2.7 Зарядталған өткізгіш пен электр өрісінің энергиясы. Поляризацияланған диэлектриктің энергиясы.

*2.1 Электр өрісіндегі өткізгіштер.* Барлық денелерді электрлік қасиеттері бойынша үш топқа бөлуге болады: өткізгіштер, жартылай өткізгіштер және диэлектриктер (ток өткізбейтіндер). Еркін зарядтары бар, яғни сыртқы электр өрісі әсерінен оның көлемі ішінде орын ауыстыра алатын зарядталған бөлшектері бар денелер өткізгіштер деп аталады.

Металл өткізгіштерде электр тогын тасымалдайтын бөлшектерге еркін электрондар жатады. Еркін электрондар деп металл атомының валенттік электрондарын (сыртқы электрондық қабықшадағы электрондарды) айтады. Еркін электрондар қалыпты температураның өзінде жылулық энергия әсерінен атом орбитасынан оңай ажырап, кристалдық тор ішінде босып жүреді. Сыртқы электр өрісі болмаған жағдайда еркін электрондар өрісі кристалдық тор түйіндеріндегі оң иондар туғызатын өріспен компенсацияланады да, өткізгіш электрлік бейтарап күйде болады.

Өткізгішті сыртқы электростатикалық өріске орналастырғанда өріс тарапынан болатын әсерден өткізгіш ішіндегі еркін электрондар сыртқы өрістің кернеулігі бағытына қарама-қарсы бағытта қозғалып, орын ауыстырады да оның қарама қарсы ұштарында әр аттас зарядтар пайда болады (2.1-сурет). Пайда болған зарядтар *индукцияланған зарядтар* деп аталады, ал өткізгіштің осындай тәсілмен зарядталуы *электростатикалық индукция құбылысы* деп аталады. Өткізгіш зарядталғаннан кейін оның ішіндегі зарядтар қозғаласы тоқтап, тепе-теңдік күйге келеді, өткізгіштің өзі айналасында электростатикалық өріс тудырады да, сыртқы өрісті өзгертеді.

Электростатикалық индукция құбылысы кезінде келесі шарттар орындалады:

1. Өткізгіш ішінде электр өрісі болмауы шарт, яғни  $E_i = 0$  (2.1)

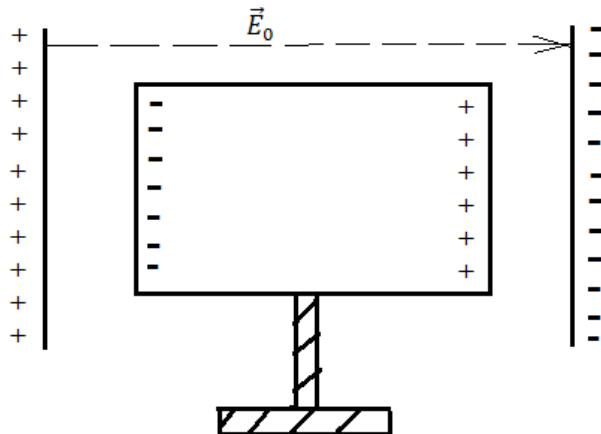
Егер өткізгіш ішінде электр өрісі болса ( $E_i \neq 0$ ), онда өріс әсерінен өткізгіш ішінде зарядтар қозғалысы тоқтамас еді да, ол зарядталмас еді.

2. Өткізгіш бетінің барлық нүктелері үшін:  $E_i = E_n$  (2.2)

Яғни өріс кернеулігі өткізгіш бетіне жүргізілген нормаль бағытымен бағыттас болуы шарт, ондай болмаған жағдайда кернеулік векторының нормаль және

тангенциал құраушылары нөлден өзгеше болар еді,  $E_{\tau}$  әсерінен зарядтар өткізгіш бетімен қозғаласын тоқтатпас еді. Бұл тәжірибелер нәтижесіне қайшы келер еді. Сондықтан  $E_{\tau} = 0$ .

3. Жоғарыдағы (2.1) және (2.2) шарттарына сәйкес өткізгіштің барлық көлемі мен сыртқы беті эквипотенциалды.

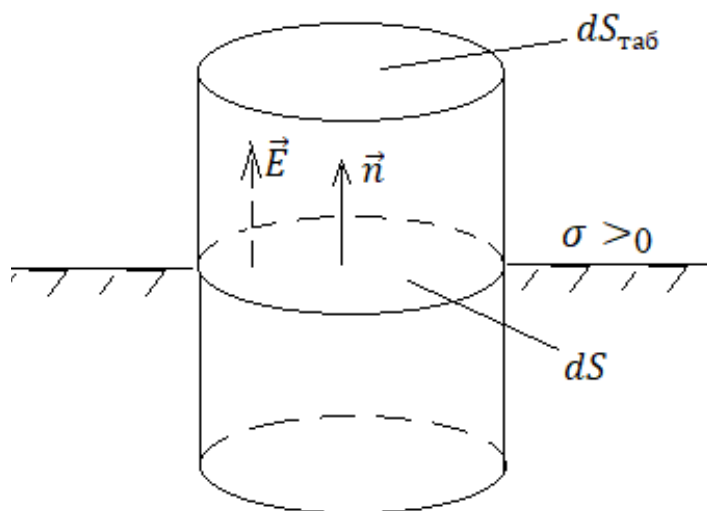


2.1-сурет

Зарядталған өткізгіш бетінің маңындағы электр өрісінің кернеулігін анықтайық. Беттік тығыздығы  $\sigma > 0$  зарядталған өткізгіш бетінен  $dS$  ауданша бөліп алып, жасаушысы сол ауданшаның нормаліне параллель болатын элементар цилиндр алайық (2.2-сурет). Остроградский-Гаусс теоремасын қолданып элементар цилиндрдің толық бетін қиып өтетін кернеулік сызықтарының ағыны тек оның табанының  $dS_{\text{таб}}$  ауданшасын қиып өтетін кернеулік сызықтарының ағынына тең болатындығын байқауға болады, себебі (2.2)-шарт бойынша  $E = E_n$  және  $E_{\tau} = 0$  болғандықтан элементар цилиндрдің бүйір бетін кернеулік сызықтары қиып өтпейді. Олай болса,  $E_n \cdot dS_{\text{таб}} = \frac{dq}{\epsilon \cdot \epsilon_0}$

мұндағы:  $dq = \sigma \cdot dS$  және  $dS_{\text{таб}} = dS$  екендігін ескерсек:  $E_n = \frac{\sigma}{\epsilon \cdot \epsilon_0}$  немесе

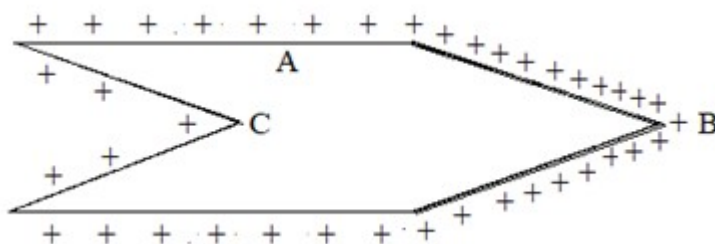
векторлық түрде 
$$\vec{E} = \frac{\sigma}{\epsilon \cdot \epsilon_0} \cdot \vec{n} \quad (2.3)$$



2.2-сурет

Сонымен: зарядталған өткізгіш бетінің маңындағы электр өрісінің кернеулігі сол бетке орналасқан зарядтың беттік тығыздығына тура пропорционал болады.

Өткізгішке берілген заряд оның сыртқы бетіне орналасқанда өткізгіштің пішініне тәуелді таралады, яғни зарядтың беттік тығыздығы өткізгіш пішініне байланысты оның барлық жерінде бірдей болмауы мүмкін. Тәжірибелер көрсеткендей шар немесе цилиндр секілді симметриялы пішінді өткізгіштерде зарядтың беттік тығыздығы біркелкі болғанымен, күрделі пішінді өткізгіштерде зарядтың оның бетіне таралуы ерекшеленеді. Өткізгіштің сүйір (А) бөліктерінің бетінде заряд тығыздығы ең көп, ал шұңқыр (ойыс) бөліктерінің (В) бетінде заряд тығыздығы ең аз мәнге ие болады (2.3-сурет), яғни  $\sigma_{max} = \sigma_B$ ,  $\sigma_{min} = \sigma_C$ ,  $\sigma_C < \sigma_A < \sigma_B$  болады.



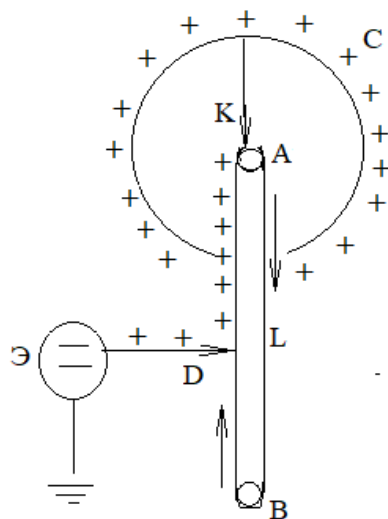
2.3-сурет

Зарядталған өткізгіштің өте сүйір ұштарында өріс кернеулігінің үлкен мәнге ие болуы салдарынан «электр желі» деп аталатын құбылыс орын алады.

«Электр желі» құбылысының пайда болу себебі өткізгіштің сүйір ұштарындағы күшті электр өрісінің әсерінен сол маңындағы ауа молекулалары ионданып, өткізгіштің сүйір ұштарымен аттас зарядталатындықтан одан тебіледі. Тебілген ауа иондары қозғалысы бағытында ауа қабатының бағытталған қозғалысы – жел пайда болады. осы құбылысты *электр желі* деп атайды.

*Ван де Граафтың электростатикалық генераторы.* Өткізгішке берілген зарядтың оның сыртқы бетіне таралу заңдылығын ескеріп, іші қуыс өткізгішке үстемелеп заряд беру арқылы оның потенциалын үлкен мәнге дейін жеткізуге болады (шексіз мәнге өсірі мүмкін емес, себебі потенциалдың белгілі бір мәнінде зарядтың өткізгіш бетінен «ағуы» орын алады). Осы принципті пайдаланып Ван де Грааф электростатикалық генератор жасады (2.4-сурет).

Ван де Граафтың электростатикалық генераторының жұмыс істеу принципі келесідей: жібек жібінен жасалған ұзындығы  $L$  лента арқылы өзара қашықтығы 10 м А және В шығыршықтарын айналдыра қозғалтады. Жоғарғы А шығыршығы іші қуыс С шардың ішкі қуысына орналасқан. Лентаның төменгі жағы (Э) электрофор машинасының бір полюсімен D тиек арқылы байланысады, электрофор машинасынан лентаға берілген заряд сүйір К тиек арқылы С шарға беріледі. Осындай тәсілмен үлкен екі шарлардың біреуін оң таңбалы зарядпен, ал екіншісін теріс таңбалы зарядпен зарядтау арқылы олардың арасындағы потенциалдар айырымын бірнеше миллион вольтқа дейін жеткізуге болады. Мұндай электростатикалық генератор зарядталған бөлшектерді үдету үшін қолданылады.



2.4-сурет

2.2 Оқшауланған өткізгіштің сыйымдылығы. Басқа өткізгіштерден және зарядталған денелерден алшақтатылған біртекті ортадағы өткізгіш оқшауланған өткізгіш деп аталады. Оқшауланған өткізгішке берілген  $q$  заряд оның пішініне тәуелді және сыртқы бетіне ішіндегі өріс кернеулігі нөлге тең болатындай таралады. Егер осы өткізгішке тағы шамасы да сондай  $q$  заряд берілсе, ол да алғашқыдағыдай таралып, өткізгіш бетіндегі зарядтың беттік тығыздығы артады. Өріс кернеулігі зарядтың беттік тығыздығына тура пропорционал болғандықтан оның да шамасы артады, яғни өткізгіш бетінің потенциалы да артады. Сонымен оқшауланған өткізгішке біртіндеп берілген заряд оның потенциалын арттырады  $q \varphi$ . Бұдан теңдікке көшу үшін пропорционалдық коэффициент қолданылады:

$$q = C \cdot \varphi \quad (2.4)$$

мұндағы:  $C$  – өткізгіштің электр сыйымдылығы деп аталатын пропорционалдық коэффициент.  $C = \frac{q}{\varphi} \left[ \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}} \right] = 1 \text{ Ф}$  – фарад. (2.5)

Радиусы  $R$  оқшауланған шардың (сфераның) потенциалы (1.53-өрнек)  $\varphi = \frac{1}{4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{q}{R}$  өрнекпен анықталады, оның сыйымдылығы:  $C = 4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot R$

Конденсатор, олардың сыйымдылығы және конденсаторлардың жалғануы. Оқшауланған өткізгіштің электр сыйымдылығы өте аз болады, сондықтан техникада заряд жинақтағыш құрал ретінде өткізгіштер жүйесі қолданылады.

Бір-біріне жақын орналасқан диэлектрик ортамен бөлінген әр аттас зарядталған екі өткізгіштен тұратын жүйені конденсатор, өткізгіштерді конденсатор астарлары деп атайды.

Конденсатор заряд жинақтаушы құрал ретінде қолданылады, оның ең негізгі ерекшелігі - оның өрісі түгелдей астарларының арасына шоғырлануы.

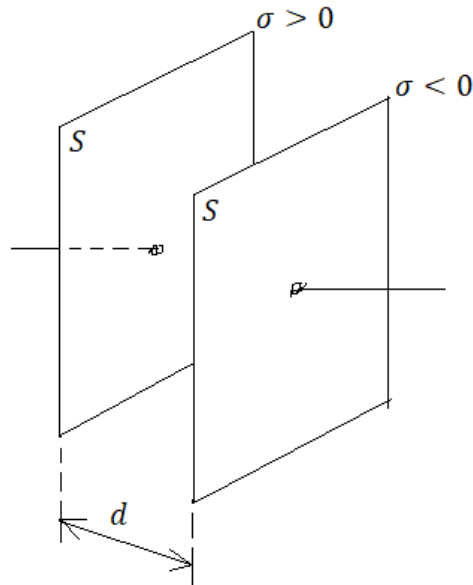
Конденсатор сыйымдылығы:  $C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} \quad (2.6)$

мұндағы:  $q$  конденсатордың бір астарындағы зарядтың шамасы, ал  $\varphi_1 - \varphi_2$  – екі астарлар арасындағы потенциалдар айырымы .

Жалпы жағдайда конденсатордың сыйымдылығы оның астарларының өлшеміне, пішініне және астарлар арасындағы ортаның қасиетіне тәуелді болады.

Іс жүзінде конденсаторлардың үш түрі жиі қолданылады:

1. Жазық конденсатор - диэлектрлік ортамен бөлінген екі жазық өткізгіш пластиналардан тұратын жүйе (2.5-сурет).



2.5-сурет

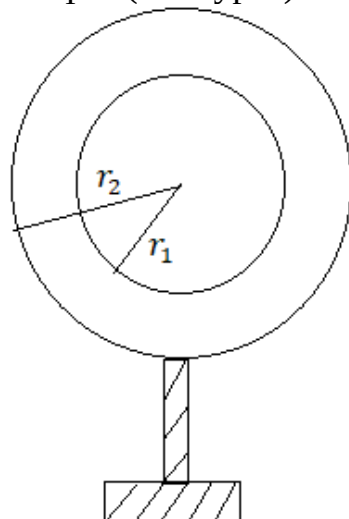
Бір астарының ауданы  $S$ , заряды  $q$ , астарларының арақашықтығы  $d$  болатын конденсатор ішіндегі кернеулігі (1.33-өрнек)  $E = \frac{\sigma}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}$ , ал астарларының

арасындағы потенциалдар айырымы  $\varphi_1 - \varphi_2 = E \cdot d$  екендігін ескерсек:  $\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\sigma \cdot d}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}$

және  $q = \sigma \cdot S$  олай болса жазық конденсатордың сыйымдылығы

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{\sigma \cdot S}{\frac{\sigma \cdot d}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d} \Rightarrow C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d} \quad (2.7)$$

2. Сфералық конденсатор – бір-біріне қатысты концентрлі орналасқан радиустары сәйкесінше  $r_1$  және  $r_2$  өзара диэлектрлік ортамен бөлінген екі металл сферадан тұратын жүйе (2.6-сурет).



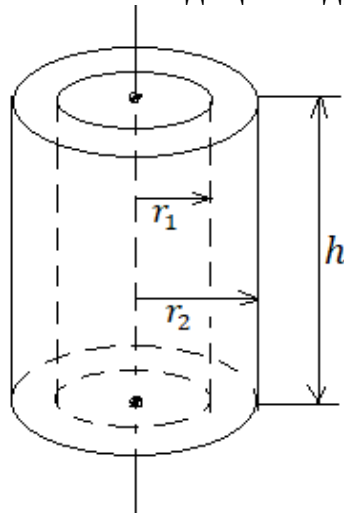
2.6-сурет

Конденсатор энергиясы екі астардың арасына жинақталады, ал потенциалдар айырымы  $\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$ , сонда сфералық конденсатор

сыйымдылығы:  $C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r_1 \cdot r_2}{r_2 - r_1} \Rightarrow$

$$C = \frac{4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r_1 \cdot r_2}{r_2 - r_1} \quad (2.8)$$

3. Цилиндрлік конденсатор – өзара диэлектрлік ортамен бөлінген радиустары сәйкесінше  $r_1$  және  $r_2$  екі коаксиальді цилиндрлерден құралған жүйе (2.7-сурет).



2.7-сурет

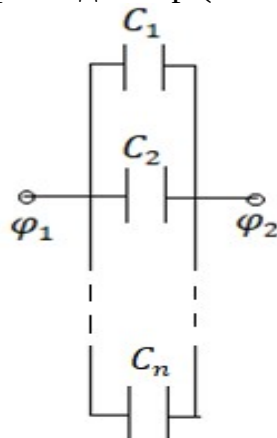
Екі коаксиальді астарлар арасындағы потенциалдар айырымы

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\tau}{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad \text{мұндағы: } \tau = \frac{q}{h} \text{ - бірлік ұзындықтағы заряд тығыздығы.}$$

Сонда  $C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot h}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \Rightarrow C = \frac{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot h}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.9)$

Әдетте қажетті сыйымдылықтағы конденсатор табылмаған жағдайда қолда бар конденсаторлардан екі түрлі тәсілмен батарея етіп жалғау арқылы қажетті сыйымдылықты алуға болады.

1. Конденсаторларды өзара параллель жалғау. Үлкен сыйымдылық қажет болған жағдайда оны қолда бар бірнеше конденсаторларды өзара параллель жалғау арқылы алуға мүмкіндік бар (2.8-сурет).



2.8-сурет

2.8-суреттен көрініп тұрғандай барлық конденсаторлар үшін  $\varphi_1$  және  $\varphi_2$  потенциалдары бірдей болғандықтан, потенциалдар айырымы да бірдей, яғни  $\varphi_1 - \varphi_2 = i \cdot \text{const}$ . Конденсатор батареясының жалпы заряды:  $q = C(\varphi_1 - \varphi_2)$

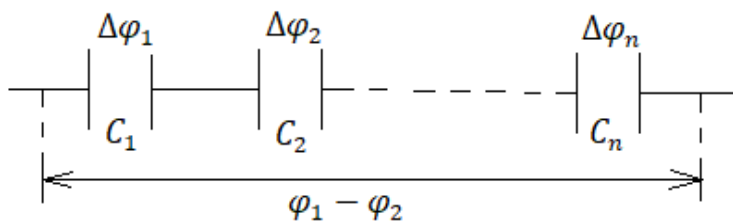
мұндағы:  $q_1 = C_1(\varphi_1 - \varphi_2)$ ,  $q_2 = C_2(\varphi_1 - \varphi_2)$ , ...,  $q_n = C_n(\varphi_1 - \varphi_2)$ . Және конденсатор батареясының жалпы заряды:  $q = q_1 + q_2 + \dots + q_n$ . Олай болса:  $q = C_1(\varphi_1 - \varphi_2) + C_2(\varphi_1 - \varphi_2) + \dots + C_n(\varphi_1 - \varphi_2) = \sum C_i \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)$ . Сонда

$q = C(\varphi_1 - \varphi_2)$  және  $q = \sum C_i \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)$  өрнектерін өзара салыстырғанда:

$$C = \sum C_i = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (2.10)$$

(2.10)-өрнектен келесідей қорытынды жасалады: конденсаторларды өзара параллель жалғағанда батареяның жалпы сыйымдылығы жеке конденсаторлардың сыйымдылықтарының алгебралық қосындысына тең болады, яғни конденсаторларды өзара параллель жалғағанда батареяның жалпы сыйымдылығы артады.

2. Конденсаторларды өзара тізбектеп жалғау. Кішірек сыйымдылық қажет болған жағдайда оны қолда бар бірнеше конденсаторларды өзара тізбектеп жалғау арқылы алуға мүмкіндік бар (2.9-сурет).



2.9-сурет

Конденсаторларды өзара тізбектеп жалғағанда барлық конденсаторлардың астарларындағы заряд шамасы бірдей болады, яғни  $q = i \cdot \text{const}$ , ал потенциалдар айырымы  $\varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 + \dots + \Delta\varphi_n$ , мұндағы:  $\Delta\varphi_1 = \frac{q}{C_1}$ ,

$$\Delta\varphi_2 = \frac{q}{C_2}, \quad \Delta\varphi_n = \frac{q}{C_n} \quad \text{және} \quad \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{C}$$

$$\text{Сонда: } \frac{q}{C} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \dots + \frac{q}{C_n} \Rightarrow \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (2.11)$$

(2.11)-өрнектен келесідей қорытынды жасалады: конденсаторларды өзара тізбектеп жалғағанда батареяның жалпы сыйымдылықтың кері шамасы жеке конденсаторлар сыйымдылықтарының кері шамаларының алгебралық қосындысына тең болады, яғни конденсаторларды өзара параллель жалғағанда батареяның жалпы сыйымдылығы кемиді.

2.3 Диэлектриктердегі электр өрісі. Байлаулы зарядтар. Полярлы және полярлы емес молекулалар. Диэлектриктердің өткізгіштерден басты ерекшелігі оның электрондары мен басқа да зарядталған бөлшектері диэлектрик ішінде орын ауыстыра алмайтынды. Сондықтан мұндай зарядтарды байлаулы зарядтар деп атайды. Диэлектриктің сыртқы өріспен әсерлесуі осы байлаулы зарядтардың қасиетіне байланысты болады.

Диэлектриктердің әрбір молекуласы оң зарядты ядродан және оны шыр айналатын теріс зарядты электрондардан құралады. Жалпы молекула электрлік жағынан бейтарап, яғни оң және теріс зарядтарының абсолют шамасы тең



болады. Бірақ бұдан молекуланың электрлік қасиеті жоқ деген қорытынды жасауға болмайды. Барлық оң зарядтар центріне орналасқан қосынды заряды  $+q$ , ал теріс зарядтар центріне орналасқан қосынды заряды  $-q$  деп қабылдасақ, онда бұл молекуланы жуықтап электр диполі ретінде қарастыруға болады. Дипольдің моменті  $\vec{p}_1$  болатын электр өрісін тудыратыны (1.13-өрнек) белгілі.

Оң және теріс зарядтардың ауырлық центрлерінің орналасу ерекшелігіне байланысты молекулаларды полярлы емес және полярлы деп екі топқа жіктейді.

Сыртқы электр өрісі болмаған жағдайда ( $E=0$ ) полярлы емес молекуланың оң және теріс зарядтарының ауырлық центрлері бір-біріне дәл сәйкес келіп, оның диполь моменті ( $p_1=0$ ) нөлге тең болады. Полярлы емес диэлектриктерге  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$  парафин, бензол т.б. жатады.

Сыртқы электр өрісі болмаған жағдайдың өзінде ( $E=0$ ) оң және теріс зарядтарының ауырлық центрлері бір-біріне сәйкес келмейтіндіктен полярлы молекуланың диполь моменті нөлден өзгеше  $p_1 \neq 0$  болады. Полярлы диэлектриктерге  $H_2O$ ,  $NH_3$ ,  $NaCl$ ,  $SO_2$ ,  $CO$  т.б. Сыртқы өріс әсеріне тәуелсіз полярлы молекуланың диполь иіні  $l=const$  болады.

Егер полярлы емес молекуланы сыртқы өріске енгізсе, онда сыртқы өрістің әсерінен электрондар ығысып, оң және теріс зарядтардың ауырлық центрлерінің беттесуі бұзылып, молекуланың диполь моменті нөлден артық мәнге ие болады да, ол электр өрісін тудырады. Пайда болған диполь бағыты сыртқы электр өрісінің кернеулік векторының бағытымен бағыттас, ал шамасы сол кернеулік векторының шамасына тура пропорционал болады.

$$p_1 = \alpha \cdot \epsilon_0 \cdot E \quad (2.12)$$

мұндағы:  $\alpha$  - молекуланың поляризацияланғыштығы деп аталады.

Сыртқы электр өрісіне қойылған полярлы молекулаға өріс тарапынан екі түрлі сипаттағы күш әсер етеді: егер  $E=const$  болса, молекуланы өріс бағытына сәйкес бұруға тырысатын шамасы (1.53)-өрнекпен анықталатын күш моменті, ал егер  $E \neq const$  болса, шамасы (1.54)-өрнекпен анықталатын айнымалы күш әсер етеді.

(2.12)-өрнек полярлы молекула үшін орындалмайды, олар үшін  $p_1'' E$  тәуелділігі күрделірек болады.

Егер полярлы емес молекулалардан құралған диэлектрикті сыртқы электр өрісіне орналастырса, өріс әсерінен молекуланың электрондық орбиталары деформацияланып, диэлектрик ішінде диполь индукцияланады. Поляризацияланудың мұндай механизмі *электрондық поляризация* деп аталады.

Полярлы молекулалардан құралған диэлектрикті сыртқы электр өрісіне орналастырғанда, оның дипольдары өріс әсерінен белгілі бір бағыт бойынша бағдарлана орналасады, өріс шамасы неғұрлым күшті болған сайын дипольдардың бағдарлануы күштірек болады. Поляризацияланудың мұндай механизмі *бағдарлық поляризация* деп аталады.

**2.4 Диэлектриктің поляризациясы. Поляризация векторы.** Сыртқы өріс әсерінен диэлектриктің поляризациялану дәрежесін сипаттау үшін, яғни



диэлектриктер поляризациясының сандық өлшемін анықтау үшін поляризация векторы деген шама енгізіледі.

Поляризация векторы ( $\vec{P}_e$ ) – бірлік көлемдегі барлық дипольдардың геометриялық қосындысын айтады. 
$$\vec{P}_e = \frac{1}{V} \sum \vec{p}_{li} \quad (2.13)$$

Егер диэлектрик ішіндегі өріс бірлік көлем аумағында біртекті болмаса, онда поляризация векторы: 
$$\vec{P}_e = \frac{d\vec{P}_l}{dV} \quad (2.14)$$

мұндағы:  $d\vec{P}_l - dV$  көлем ішіндегі қорытқы дипольдің геометриялық қосындысы.

Сыртқы электр өрісіне енгізілген полярлы емес молекулалардан құралған біртекті диэлектрик үшін: 
$$\vec{P}_e = n_0 \cdot \vec{p}_l \quad (2.15)$$

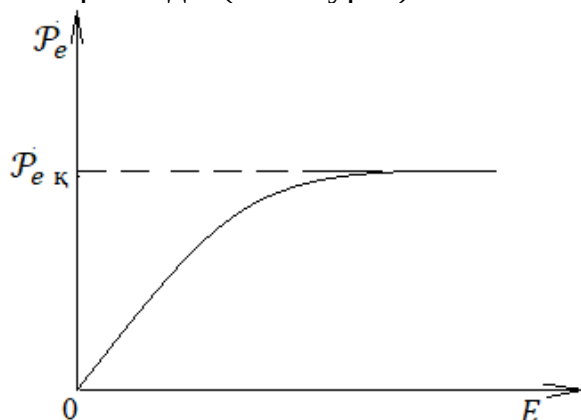
мұндағы:  $\vec{p}_l$  векторының бағыты поляризациялаушы сыртқы электр өрісінің кернеулік векторының бағытымен бағыттас, ал поляризация векторының шамасы сол кернеулік шамасына тура пропорционал.

(2.15)-өрнекке (2.12)-өрнекті апарып қойса:

$$\vec{P}_e = n_0 \cdot \alpha \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E} = \chi \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E} \quad (2.16)$$

мұндағы  $n_0 \cdot \alpha = \chi$  - заттың диэлектрлік қабылдағыштығы деп аталады.

Әлсіз электр өрісіндегі полярлы молекулалардан құралған диэлектрик үшін де (2.16)-өрнек орындалатынын Дебай дәлелдеген болатын, бірақ сыртқы электр өрісінің кернеулігінің шамасы артқан сайын  $\vec{P}_e$  және  $\vec{E}$  арасындағы сызықты тәуелділік бұзылады (2.10-сурет).



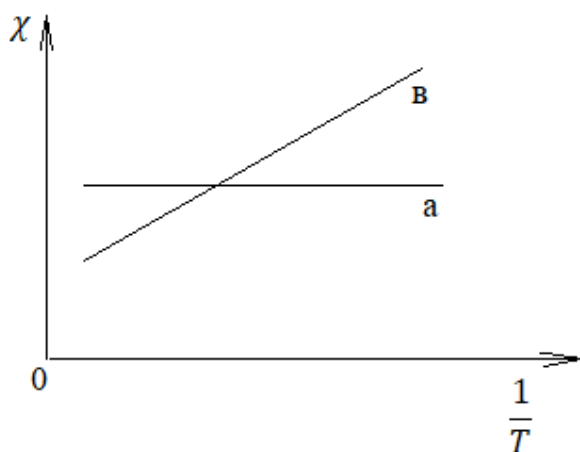
2.10-сурет

$\vec{E}$  кернеулік векторының шамасы артуына байланысты диэлектриктің барлық молекулаларының дипольдық моменттері түгелдей өріс бағытымен бағытталады (қанығу) күйіне жетеді ( $P_e = P_{eк}$ ), сол күйден бастап өріс кернеулігінің шамасы артқанымен поляризация векторының шамасы өзгеріссіз қалады, яғни поляризация «қанығады».

Заттың диэлектрлік қабылдағыштығының температураға тәуелділігі ( $\chi = f(T)$ ) полярлы және полярсыз диэлектриктерде түрліше (2.11-суретте диэлектрлік қабылдағыштықтың температураның кері шамасына тәуелділік графигі берілген: а- полярлы емес диэлектрик үшін; в-полярлы диэлектрик үшін).

Жалпы жағдайда диэлектрикті ортаны изотропты және анизотропты деп екі топқа жіктейді. Изотропты ортада поляризация векторы тұрақты ( $\vec{P}_e = \epsilon \cdot \text{const}$ ) және поляризация векторы мен сыртқы өріс кернеулік векторы бағыттас, әрі

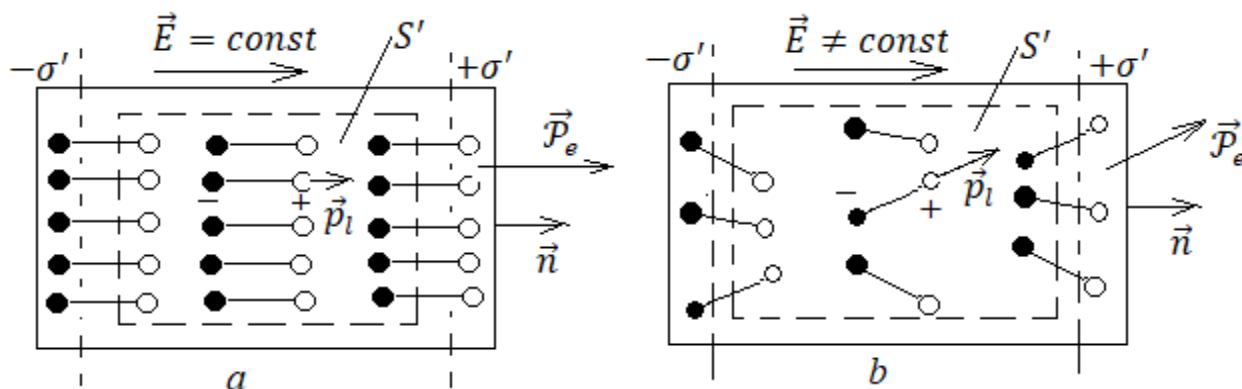
екеуінің арасындағы байланыс (2.16)-өрнекпен анықталады. Ал анизотропты ортада изотропты ортадағы шарттар орындалмайды.



2.11-сурет

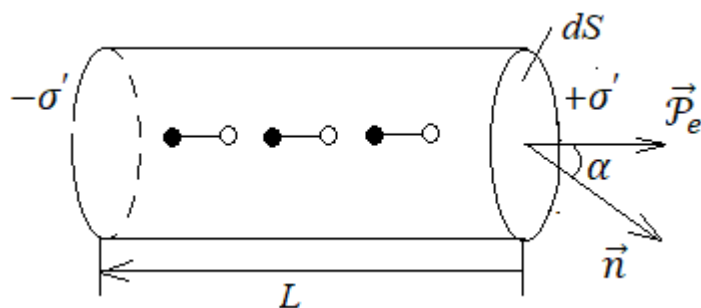
Сыртқы тұрақты электр өрісіне изотропты диэлектрик енгізілсе, онда оның барлық нүктелерінде поляризация векторының мәні бірдей болады, ішкі көлеміндегі дипольдық зарядтардың көршілерімен әр аттас орналасуына сәйкес бір-бірін компенсациялап, диэлектрик іші бейтарап (нейтраль) күйде болады, бірақ екі шеткі жұқа беттік қабаты бейтараптанбайды (2.12-сурет). 2.12-суреттен көрініп тұрғандай *a* және *b* жағдайларында да пунктир сызықшамен белгіленген *S'* аймақта орта бейтарап, бірақ пунктир сызықшамен белгіленген *S'* аймақтан тыс диэлектриктердің екі шеткі беттері бейтараптанбаған (нейтралданбаған), сол екі шеткі жұқа беттік бөліктерде байлаулы зарядтың беттік тығыздығы ( $\sigma'$ ) пайда болады да, поляризация векторын тудырады.

2.12-суреттің *a* жағдайында (полярлы емес диэлектрик) сыртқы өріс біртекті, сондықтан  $\vec{P}_e$  және  $\vec{E}$  векторлары өзара параллель, әрі бағыттас, ал *b* жағдайында (сыртқы өріс біртекті емес)  $\vec{P}_e$  және  $\vec{E}$  векторлары бағыттас емес.



2.12-сурет

Осы екі жағдай үшін байлаулы зарядтың беттік тығыздығы ( $\sigma'$ ) мен поляризация векторы  $\vec{P}_e$  арасындағы байланысты тағайындауға болады. ол үшін диэлектрик ішінен табандарының ауданы  $dS$  жасаушысы  $L$  элементар цилиндр бөліп қарастырылады (2.13-сурет).



2.13-сурет

Осы элементар цилиндрді табандары шамасы  $\sigma' \cdot dS$  әр аттас зарядтармен зарядталған үлкен диполь ретінде қабылдап, оның диполь моментін табады:  $d p_l = \sigma' \cdot dS \cdot L$ . Бұл өрнекті (2.14)-өрнекке қойғанда:  $P_e = \frac{\sigma' \cdot dS \cdot L}{dV}$  мұндағы  $dV$  – элементар цилиндрдің көлемі  $\Rightarrow dV = dS_n \cdot L$

$$dS_n = dS \cdot \cos \alpha \quad \text{Сонда:} \quad P_e = \frac{\sigma' \cdot dS \cdot L}{dS \cdot L \cdot \cos \alpha} \quad \Rightarrow \quad P_e \cdot \cos \alpha = \sigma'$$

$P_e \cdot \cos \alpha = P_{en}$  мұндағы:  $P_{en}$  –  $\vec{P}_e$  векторының  $dS$  ауданының нормаліне түсірілген проекциясы. Сонымен:  $P_{en} = \sigma'$  (2.17)

$$(2.17) \text{ – өрнектің векторлық түрі: } \vec{P}_e = \sigma' \cdot \vec{n} \quad (2.18)$$

(2.18)-өрнектен: егер  $\vec{n} \parallel \vec{P}_e$  болса, онда  $P_{en} = \sigma'$  орындалады, ал егер  $\vec{n} \perp \vec{P}_e$  болса, онда  $\cos \alpha = 0$  болғандықтан  $P_e = 0$  (2.19)

2.5 Диэлектриктегі электр өрісінің кернеулігі. Электр өрісінің кернеулігі (1.5)-өрнектен заттық ортада  $\epsilon$  есеге кемитіндігі көрінеді. Оның себебі ортаның электрлік қасиетіне байланысты, яғни сыртқы электр өрісіне енгізілген диэлектрик сыртқы өріске қарсы әсер ететін өз өрісін тудырады.

Диэлектрик сыртқы электр өрісіне енгізілгенде оның ішіндегі екі өрістің қорытқы кернеулігі суперпозиция принципіне сәйкес еркін және байлаулы зарядтардың тудыратын өріс кернеуліктерінің қосындысымен анықталады:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' \quad (2.20)$$

мұндағы  $\vec{E}_0$  – еркін зарядтардың электр өрісінің кернеулік векторы, ал  $\vec{E}'$  –  $\vec{E}_0$  еркін зарядтардың электр өрісінің әсерінен поляризацияланған диэлектриктегі байлаулы зарядтардың электр өрісінің кернеулік векторы.

Біртекті электр өрісіне жазық диэлектрик енгізілсін (2.14-сурет). 2.14-суреттен көрініп тұрғандай диэлектриктегі байлаулы зарядтардың электр өрісінің кернеулік векторы еркін зарядтардың электр өрісінің кернеулік векторына қарсы бағытталады, олай болса қорытқы өріс кернеулігі айырмамен анықталады:

$$E = E_0 - E' \quad (2.21)$$

Беттік тығыздығы  $\sigma$  еркін және  $\sigma'$  байлаулы зарядтардың өрістері әр аттас зарядталған екі шексіз жазықтықтың өрісінің кернеулігі:

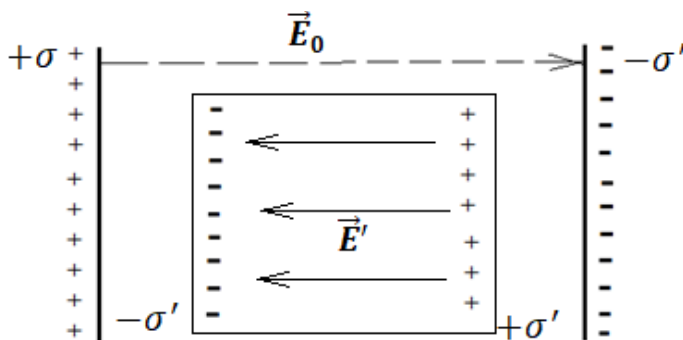
$$E_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_0}, \quad E' = \frac{\sigma'}{\epsilon_0} \quad \text{Сонда:} \quad E = \frac{\sigma - \sigma'}{\epsilon_0} \quad (2.22)$$

$$P_e = \sigma' \text{ ал мұндағы: } P_e = \chi \cdot \varepsilon_0 \cdot E \text{ ескеріп, } E = E_0 - \frac{\sigma'}{\varepsilon_0} \Rightarrow$$

$$E = E_0 - \frac{P_e}{\varepsilon_0} = E_0 - \frac{\chi \cdot \varepsilon_0 \cdot E}{\varepsilon_0} = E_0 - \chi \cdot E \Rightarrow E \cdot \varepsilon = E_0 - \chi \cdot E \Rightarrow$$

$$E = \frac{E_0}{1 + \chi} \text{ мұндағы: } 1 + \chi = \varepsilon \Rightarrow E = \frac{E_0}{\varepsilon} \quad (2.23)$$

Сонымен  $\varepsilon = 1 + \chi$  - ортаның электрлік қасиетін сипаттайтын, ортаның салыстырмалы диэлектрлік өтімділігі деп аталатын шама.



2.14-сурет

(2.23)-өрнектен диэлектрлік ортадағы электр өрісінің кернеулігі вакуумдағы (ауадағы) электр өрісінің кернеулігінен  $\varepsilon$  есе кіші болатындығы байқалады, яғни диэлектрик орта электр өрісін  $\varepsilon$  есе кемітеді.

*Ығысу векторы. Диэлектрик өрісі үшін Остроградский-Гаусс теоремасы.* Диэлектрик ішіндегі электр өрісі екі түрлі өрістердің қорытқы өрісі болып табылады, осы қорытқы өрістің кернеулік сызықтарының ағынын анықтайық. Тұйық бет арқылы өтетін кернеулік векторының ағыны

(1.30)-өрнекке сәйкес  $\oint E_n \cdot dS = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \sum q_i$ , олай болса Остроградский-Гаусс

теоремасы бойынша  $\oint E_n \cdot dS = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot (q + q')$  (2.24)

мұндағы:  $q, q'$  - сәйкесінше еркін және байлаулы зарядтардың тұйық бет ішіндегі жиынтығы.

Тек байлаулы зарядтар өрісінің кернеулік сызықтарының ағыны:

$$\oint E'_n \cdot dS = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot q' \quad (2.25)$$

(2.25)-өрнектің екі жағын да  $\varepsilon_0$ -ға көбейтіп,  $E' = \frac{\sigma'}{\varepsilon_0}$  екенін ескерсек:

$$-\oint \sigma' \cdot dS = q' \quad (2.17)\text{-өрнектен } P_{en} = \sigma' \text{ орнына қойсақ:}$$

$$-\oint P_{en} \cdot dS = q' \quad (2.26)$$

(2.26)-өрнектен келесідей қорытынды жасауға болады: байлаулы зарядтар өрісінің ағыны поляризация векторының ағынына тең болады.

(2.24)-өрнектің екі жағын да  $\epsilon_0$ -ға көбейтіп,  $q'$  орнына (2.26)-өрнекті қойсақ:  $\oint \epsilon_0 \cdot E_n \cdot dS = q - \oint P_{en} \cdot dS \Rightarrow \oint (\epsilon_0 \cdot \vec{E}_n + \vec{P}_{en}) dS = q$   
 немесе:  $\oint (\epsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P}_e)_n dS = q$  (2.27)

(2.27)-өрнектен: электр өрісіндегі диэлектрик өрісінің қорытқы кернеулігі сызықтарының ағыны тек тұйық бет ішінде орналасқан еркін зарядтардың жиынтығына ғана тәуелді, байлаулы зарядтарға тәуелді болмайды. Сондықтан интеграл таңбасы астындағы шаманы өрістің жаңа күштік сипаттамасы болып табылатын, өрістің ығысу векторы деп атау келісілген:  $\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P}_e \Rightarrow$

$$\oint \vec{D}_n dS = q \quad (2.28)$$

(2.28)-өрнекті ығысу векторының ағыны немесе *диэлектрик өрісі үшін Остроградский-Гаусс теоремасы* деп атайды.

$\vec{P}_e = \chi \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E}$  екендігін ескеріп,  $\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P}_e$  өрнегін былайша жазуға болады:  
 $\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E} + \chi \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E} = (1 + \chi) \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E} = \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E}$   
 $\vec{D} = \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E}$  (2.29)

**2.6 Сегнетоэлектриктер.** Сыртқы электр өрісі болмаған жағдайда да өздігінен (спонтанды) поляризацияланатын диэлектриктер тобы бар. Мұндай құбылыс ең алғаш сегнет тұзында байқалған, сондықтан осы қасиетке ие диэлектриктерді сегнетоэлектриктер деп атайды. Сегнетоэлектриктер тобына барий титанаты ( $BaTiO_3$ ), натрий нитраты ( $NaNO_2$ ), калий дигидрофосфаты ( $KH_2PO_4$ ) т.б. жатады.

Сегнетоэлектриктер келесідей қасиеттерге ие:

1. Сегнетоэлектриктердің салыстырмалы диэлектрлік өтімділігі ( $\epsilon$ ) мен диэлектрлік қабылдағыштығының ( $\chi$ ) мәндері бірнеше жүзден бірнеше мыңға дейінгі аралықтарда жатады;

2. Салыстырмалы диэлектрлік өтімділігі ( $\epsilon$ ) сыртқы электр өрісінің кернеулігіне  $\epsilon = f(E)$  тәуелді, өйткені әрбір сегнетоэлектриктің төменгі және жоғарғы Кюри нүктелері деп аталатын екі температурасы болатындығындағ яғни  $\epsilon = f(T)$ ;

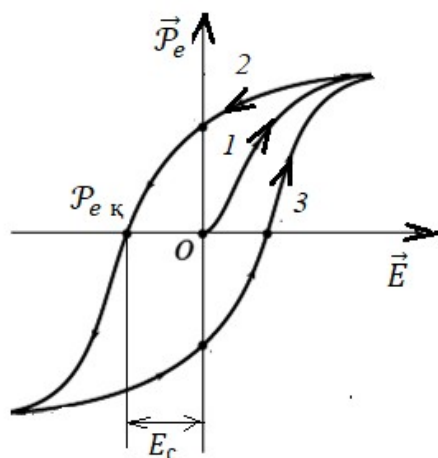
3. Сегнетоэлектриктердің поляризациялануы диэлектрлік гистерезис құбылысы орын алады (2.15-сурет).

Сыртқы электр өрісі болмаған жағдайда да сегнетоэлектриктердің өздігінен поляризациялануын домендермен түсіндіреді. *Домендер деп дипольдік моменттері біріңғай бағытта болатын кристалдың жекеленген аймағын айтады.* Қалыпты жағдайда барлық домендердің бағыты бейберекет, сондықтан олардың қорытқы өрісі нөлге жуық болады. Егер сырттан өріс әсер етсеи немесе кристалл температурасы Кюри нүктесіне таяғанда домендар бағытталған қозғалысқа түседі де, кристалл өздігінен (спонтанды) поляризацияға ұшырайды.

Сегнетоэлектриктерден өзге әртүрлі диэлектриктер қоспасынан жасалған, поляризацияланған күйін ұзақ сақтай отырып, айналасында электр өрісін

тудыратын *электреттер* деп аталатын заттар арнайы дайындалып, қолданылады.

*Электреттер* деп сыртқы поляризациялаушы әсер тоқтаса да елеулі уақыт бойы поляризацияланған күйін сақтап, айналасында электр өрісін тудыратын диэлектриктерді айтады.

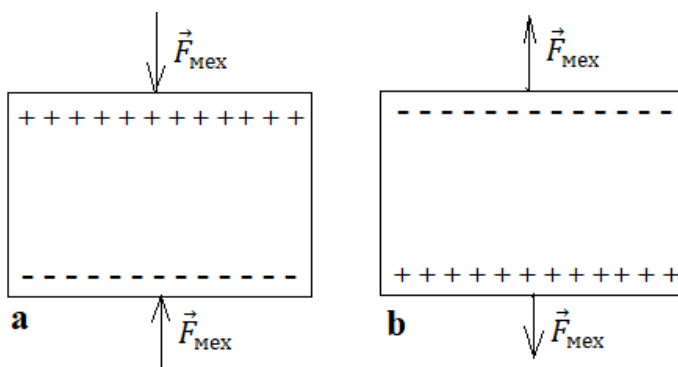


2.15-сурет

**Пьезоэлектрлік эффект.** Кейбір кристалдарды деформациялағанда олар поляризацияланып, нәтижесінде кристалл қырларында зарядтар пайда болады, бұл құбылысты Жак және Пол Кюрилер 1880 жылы байқаған. Деформация салдарынан кейбір кристалдардың поляризациялану құбылысы *пьезоэлектрлік эффект* деп аталады (2.16-сурет: а-сығылу деформациясы кезінде, б-созылу деформациясы кезінде).

Пьезоэлектрлік эффект құбылысы барлық кристалдарда байқала бермейді (әдетте кристалдық торының симметриялық центрі бар кристалдарда пьезоэлектрлік эффект байқала бермейді), ол кристалдық тор ерекшелігіне және оның электрлік осіне байланысты болады.

Пьезоэлектрлік эффект құбылысы байқалатын кристалдарға кварц, сегнет тұзы, барий метатитанаты т.б. жатады. Олардың кристалдық торларының симметриялық центрі болмайды және деформация электрлік ось бойымен жасалғанда ғана пьезоэлектрлік эффект құбылысы байқалады. Олай болса, симметриялық центрі болмағандықтан деформациялағанда бұл заттардың кристалдық торларындағы атомдар бір-біріне қатысты ығысып, дипольдық момент тудырады да, заттың электрленуі орын алады.



2.16-сурет

Пьезоэлектрикті сыртқы электр өрісіне қойғанда пьезоэлектрлік эффект құбылысына кері эффект байқалады, яғни сыртқы өріс әсерінен кристалл поляризацияланады, нәтижесінде ол деформацияланады.

2.7 *Зарядталған өткізгіштің электр өрісінің энергиясы.* Электр өрісінің кернеулігі үшін жазылған (1.50)-өрнектің екі жағын да  $q$  заряд шамасына көбейткенде:  $q \cdot \vec{E} = -q \cdot \text{grad } \varphi$ ,  $q = \text{const}$ ,  $q \cdot \varphi = W_p$  және  $q \cdot \vec{E} = \vec{F}$  екендігін ескерсек:  $\vec{F} = -\text{grad } W_p$  (2.30)  
мұндағы:  $\vec{F}$  – өріс тарапынан  $q$  нүктелік зарядқа әсер ететін күш;  $W_p$  - сол өрістегі нүктелік зарядтің потенциалдық энергиясы.

Сыйымдылығы  $C$ , заряды  $q$ , потенциалы  $\varphi$  оқшауланған өткізгішке шексіздіктен  $dq$  заряд тасымалдағанда электр өрісі күшіне қарсы атқарылатын элементар жұмыс:  $dA = \varphi \cdot dq$  мұндағы:  $dq = C \cdot d\varphi$  ескерсек:

$dA = C \cdot \varphi \cdot d\varphi$ . Өткізгішті 0-ден  $\varphi$ -ға дейін зарядтау үшін атқарылатын толық жұмысты табу үшін  $dA = C \cdot \varphi \cdot d\varphi$  өрнегін интегралдау жеткілікті:

$$A = \int_0^{\varphi} C \cdot \varphi \cdot d\varphi = \frac{C \cdot \varphi^2}{2} \quad (2.31)$$

(2.31)-өрнекті оқшауланған заряды бар өткізгіштің энергиясы деп те атайды, яғни:  $W_{эл} = \frac{C \cdot \varphi^2}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{\varphi \cdot q}{2}$  (2.32)

Сонда зарядталған конденсатордың энергиясы:

$$W_{эл} = C \cdot \varphi \cdot \varphi \quad (2.33)$$

Жазық конденсатор жағдайында оның сыйымдылығы  $C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}$ , ал потенциалдар айырымы  $\Delta \varphi = E \cdot d$  Сонда:  $W_{эл} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2 \cdot V}{2}$  (2.34)

$V = S \cdot d$  – конденсатор астарындағы өріс көлемі, ал  $E$  - конденсатор астарындағы біртекті өріс кернеулігі.

Жазық конденсатор өрісінің біртекті және өріс энергиясы бірдей тығыздықпен таралатындығын ескеріп, (2.34)-өрнекті  $V$ -ге бөлу арқылы электр өрісінің энергиясының тығыздығын анықтауға болады:

$$\omega_{эл} = \frac{W_{эл}}{V} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2}{2} = \frac{\vec{D} \cdot \vec{E}}{2} \quad (2.35)$$

*Поляризацияланған диэлектриктің энергиясы.* Сыртқы электр өрісіне қойылған біртекті диэлектрик өріс әсерінен поляризацияланады, яғни өріс поляризация үдерісі кезінде дипольдың электрондық орбитасын деформациялап немесе оны өріс бағытымен бұру үшін жұмыс атқарады. Осы жұмысты атқару үшін қажетті поляризацияланған диэлектрикте энергия қоры болуы шарт. Сол энергия қорын есептейтін өрнекті табайық.

Полярля емес диэлектриктің диполь моменті:

$$p_e = q \cdot l = \alpha \cdot \varepsilon_0 \cdot E \quad (2.36)$$



мұндағы:  $\alpha$ -дипольдың поляризацияланғыштығы,  $l$ -диполь иіні,  $q$ -диполь заряды.

$q$  зарядқа кернеулігі  $E$  өріс тарапынан  $q \cdot E$  күш әсер етеді де, оны  $dl$  –ге ұзартқанда атқарылатын элементар жұмыс:  $dA = q \cdot E \cdot dl$

(2.36)-өрнектен:  $q \cdot dl = \alpha \cdot \varepsilon_0 \cdot dE$ . Атқарылатын толық жұмысты табу үшін соңғы

өрнекті 0-ден  $E$ -ге дейін интегралдасақ:  $A = \frac{\alpha \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2}{2} = \frac{p_e \cdot E}{2}$  (2.37)

Дипольдың бірлік көлемдегі тығыздығы (саны)  $n_0$ , ал энергия тығыздығы:

$\omega_{эл\ диэл} = n_0 \cdot A = n_0 \cdot \frac{p_e \cdot E}{2}$  мұндағы:  $n_0 \cdot p_e = P_e$ ,  $\chi = \varepsilon - 1$  және  $P_e = \chi \cdot \varepsilon_0 \cdot E$  екендігін

ескерсек:  $\omega_{эл\ диэл} = \frac{P_e \cdot E}{2}$  (2.38)

немесе  $\omega_{эл\ диэл} = \frac{\varepsilon_0 \cdot (\varepsilon - 1) \cdot E^2}{2}$  (2.39)

(2.39)-өрнек поляризацияланған диэлектрик энергиясының көлемдік тығыздығының өрнегі.

#### Бақылау сұрақтары

1. Электростатикалық индукция құбылысын түсіндіріңіз.
2. Зарядталған электр өткізгішінің электр өрісіне талдау жасаңыз.
3. Оқшауланған өткізгіштің электр сыйымдылығы туралы баяндаңыз.
4. Диэлектриктердің электр өрісі табиғаты жайлы пікіріңізді айтыңыз.
5. Диэлектриктердің поляризация құбылысының механизмі туралы ойыңызды түйіндеңіз.
6. Диэлетриктердің өрісі үшін Остроградский-Гаусс теоремасының физикалық мағынасын ашыңыз.
7. Сенетоэлектриктер мен пьезоэлектрлік құбылыс туралы түсінігіңізді пысықтаңыз.
8. Зарядталған өткізгіш пен электр өрісі энергиясының арасындағы байланысты ашыңыз.