# Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті

# А.М. Жукешов

газдЫҚ разряд физикасы

«Рекомендовано УМО РУМС по гуманитарным и естественнонаучным специальностям высшего и послевузовского образования МОН РК на базе КазНУ имени аль-Фараби»(Протокол № \_\_\_ от \_\_\_\_\_ года).

Алматы

«Қазақ университеті»

2017

# ӘӨЖ 537.525

КБЖ 22.333

Рецензенттер:

физика-математика ғылымдарының докторы К.А. Жақсыбекова

физика-математика ғылымдарының докторы Б.М. Ибраев

физика-математика ғылымдарының кандидаты Ш.Г.Гинаятова

**Жукешов А.М.**

Газдық разряд физикасы.- Алматы:

Қазақ университеті, 2017. –

**ISBN**

Оқу құралында газдық разряд көздерінің теориясымен бірге замануи жарық құралдардың толық сипаттамасы берілген. Газдық разрадтардың негізгі түрлері қарастырылып, оларда өтіп жатқан физикалық процесстері сарапталған. Оқу құралында өндірісте қолданатын разрядтық шамдардың түрлері келтірілген және олардың негізгі сиптаматлары берілген. Осы оқу құралы студенттерге қосымша мәліметтерді меңгеруге арналған.

**Кіріспе**

Газдардағы электр разрядтары, газдық разрядтар – электр өрісінің әсерінен газдар арқылы электр тоғының өтуі. Газда металл мен сұйықтағыдай бос зарядтар (электрондар мен иондар) болмайды. Газдар, негізінен, бейтарап атомдар мен молекулалардан тұратындықтан, олар қалыпты жағдайда электр тоғын өткізбейтін диэлектриктер қатарына қосылады. Сондықтан газ ішіндегі электр тоғы қатты өткізгіштер мен электролиттердегі тоққа мүлде ұқсамайтын бір қатар ерекше құбылыстар туғызады. Газ арқылы электр тоғы өтү үшін, оны иондау (яғни оның ішінде жеткілікті мөлшерде зарядты бөлшектердің пайда болуы) керек. Мұндай зарядты бөлшектер кейбір фактордың әсерінен пайда болады немесе газға сырттан енгізіледі; не болмаса электродтар арасындағы электр өрісінің әсерінен пайда болады. Осындай әсерлер нәтижесінде газда электр тоғының пайда болуын **газдық разрядтар** деп атайды. Газдағы зарядты бөлшектер (заряд тасушылар) сыртқы факторлардың, яғни ионизаторлардың (жалын, рентген сәулелері, термоэлектрондық эмиссия, радиоактивті сәулелер т.б.) әсерінен пайда болса, онда ол тәуелді разряд деп аталады.

Төмен қысымда, разряд солғын ба, сынапты немесе қыздырылатын катодты доға ма оған қарамастан, оң бағана изотермиялық емес плазма болады. Атмосфера және одан да жоғары қысымда газдың температурасы тез артатындықтан, оның термиялық жолмен де иондалуы мүмкін. Солай бола тұрса да электрондық температура төмен қысым бағанасына қарағанда, әлде-қайда төмен болатын көрінеді. Демек, жоғары қысым бағанасын изотермиялық плазмаға жақын (бірінші жуықтау шамасында) деп есептеуге болады. Мұндай бағананың қасиеті электродтардың материалына, газдың табиғатына және доғаның еркін атомсферада немесе тұйықталған кеңістікте жануына байланысты анықталады. Разрядтың ерекше бір түрі – тажды разряд. Бұл разряд бір немесе екі электрод та өте үшкір болып келгенде байқалады. Мұндай жағдайда өрістің біртекті болмауы электродтар арасындағы кеңістіктің әр бөлігіндегі иондалудың әр түрлі болуына әкеп соғады, яғни бір аймақта иондалу күштірек болса, ал оның басқа бір бөлігінде электр өрісі тек зарядтарды ғана тасылдайды.

Егер тұрақты ток көзінен қорөктенген газдардың электр разрядтарында катодтағы құбылыс басты роль атқарса, жоғары жиілікті айынымалы электр өрісінде бұл роль мәнін жояды. Газдағы жоғары жиілікті электр разряды электродтарсыз да байқалады. Айнымалы электр өрісі әсерінен плазма пайда болады және ол электрондарға диффузия мен рекомбинация салдарынан кеміген заряд тасушылардың орнын толтырарлықтай (иондалуға жеткілікті) энергия береді. Жоғары жиілікті разрядтардың сыртқы көрінісі мен сипаттамалары газдың қысымына, айнымалы өрістің жиілігіне және берілген қуатқа байланысты анықталады, ал оның бірқатар қасиеттері тұрақты токтағы разрядтың оң бағанасына ұқсас болады. Атмосфералық қысымда аса күшті электр өрісіндегі электродтар ұшқынды разрядтар пайда болады. Оның бір түрі – найзағай.

Газдардың электр разрядтарының сан алуандығы және олардың негізгі параметрлерін қалауымызша өзгертуге болатындығы бұл құбылысты кеңінен пайдалануға мүмкіндік береді. Әсіресе газдардағы электр разрядтары воль-амперлік сипаттамалары, сәуле шығаруы, жылу беруі, қозған атомдар түзуі, молекулардың құрылымын өзгертуі т.б. қасиеттері көбірек пайдаланылады. Газдағы аса күшті электр разрядтарының көмегімен басқарылатын термоядралық реакцияларды жүзеге асыруға қажетті жоғары температураны алуға қол жетті. Жарықтың газ разрядтық көздері барынша тиімді және күшті жарық алуға, ал қажеттігіне қарай өзі шығаратын сәуленің спектрлік құрамын да өзгертуге мүмкіндік береді. Оптикалық және инфрақызыл диапазондардағы (газдық лазерлердегі) кванттық генераторлардың физикалық негізі осы газдардағы электр разрядтарына негізделген. Газдардағы электр разрядтары химиялық синтезде, атап айтқанда, ауадағы азотты бөліп алуда қолданылады. Иондық приборлардың көпшілігі токты түрлендіру, кернеуді стабилизациялау, сигнал беру (газотрандар, тиратрондар, сынапты түзеткіштер, солғын разряд приборлары т.б.) тәрізді электр схемаларының түрлі элекменттерінің қызметін атқарады. Бұл приборлардағы жұмыстық ток миллиампердлің бірнеше үлесінен мыңдаған А-ге және бірнеше В-тан жүздеген кв-қа жетеді. Приборладың басқа бір топтары иондаушы сәулелерді тіркеу және өлшеу үшін, зарядталған атомдық бөлшектерді есептеу үшін (иондалу камерасы, зарядты бөлшек санауыштары, қайыра есептеуші, тетіктер) төмен қысымдарды өлшеу үшін тағы басқалар қолданылады. Газдардың электріның жылу энергиясын тікелей электр энергиясына айналдыруға (магнитогидродинамикалық генераторлар, термоэлектрондық түрлендіргіштер) және космос корабльдеріне арналған ұзақ уақыт жұмыс істейтін қозғалтқыштарды (плазмалық және иондық) жасауға қолданылуы мүмкін.

**1-ТАРАУ. СОЛҒЫН РАЗРЯДТЫҢ ТЕОРИЯСЫ**

**1.1 Газдардағы бөлшектердің орташа еркін жүру жолының ұзындығы**

Молекулалардың бір-бірімен соғысуы, олардың хаостық қозғалысынан болып, молекулалардың бағыты мен жалдамдығын үздіксіз өзгертіп отырады. Әрбір молекулалардың қозғалыс траекториясының түрі кеңістіктегі сынған сызықтар мен қималарға ұқсайды. Бірақ та, мұндай қималардың (сызықтардың) орташа ұзындығы, соқтығысулардың көптеген сандарының шамасына тең болады.Ондай шамаларды *еркін жүрудің орташа ұзындығы* немесе *молекулалардың орташа еркін жүруі* деп атайды және  деп белгіленеді.

 (1.1)

Мұндағы *Z-*1с ішінде молекулалардың басқа молекулалармен соқтығысулар саны.

1 с ішінде молекула  жол жүреді және диаметрі σ тең болатын дәл сондай молекуламен соқтығысады. Олай болса, центрі цилиндрдің көлемінің биіктігінде орналасқан, саны бойынша υ және радиусы σ тең *Z* молекулалар санына тең болады:

*Z=n*πσ2 (1.2)

Мұндай пайымдаулар мынадай жағдайда дұрыс болады, егер молекула қозғалыстағы молекуламен қозғалыссыз соқтығысатын болса. Шын мәнінде молекулалардың қозғалысының арасындағы молекула жылулық қозғалыста болады. Бұл (1.2) формулаға  орнына молекулалардың орташа салыстырмалы жылдамдығын  енгізуді талап етеді. Күрделі емес есептеулер, молекулалардың хаосты қозғалысы кезінде мұндай жылдамдық абсолюттік шамасы бойынша мынаған тең болатынын көрсетті

 (1.3)

Осылайша молекулалардың жылулық қозғалысы түзетулермен

 (1.4)

*Z* мәнін (1.1) формулаға қойып, мынаны аламыз

 (1.5)

Бұл өрнек молекуланың еркін қозғалысының орташа ұзындығы олардың контенрациясына кері пропорционал, ал газдың қысымы мен температурасы былай анықталады.

 (1.6)

Газдың қысымын *p=1* Па және температураны T=273 K, қабылдап мынадай өрнек аламыз

 (1.7)

 шамасы газдың түріне және оның параметріне тәуелді. шамасын газдағы берілген қысым мен температурадағы  арқылы табамыз

 (1.8)

 шамасы әдетте *p0* деп белгіленеді және 00C келтірілген қысым деп аталады. Онда 1.8 өрнегінің түрін мынадай қарапайым түрде жазуға болады:

 (1.9)

 шамасының мәні әртүрлі газдар үшін анықтамаларда келтіріледі. Бұл  шамасының 1.9 формула бойынша газдардағы нақты қысым мен температурада есептеуге мүмкіндік береді.

**1.2 Газдардағы заряд тасымалдаушылар**

Электрөткізгіштік дегеніміз электр өрісінің әсерінен еркін зарядтардың тасымалдануын (қозғалысын) айтамыз.

Қарапайым шарттарда, газдардағы аса қатты үлкен емес температурада, газ нейтралды молекулалардан тұрады. Құрамында электр зарядттарын еркін тасымалдаушылар болмағандықтан, олардың электрөткізгіштігі туралы айтудың ешқандай мағынасы жоқ. Бірақта, зарядттардың еркін тасымалдаушылары (электрондар мен иондар) газдық ортада қатты денелердің эмиссиясы нәтижесінде пайда болады.

Газдардың р қысымы және Т температурасы, құрамында *ne*электрон концентрациясы бар, қандай да бір газды қарастырайық. Электр өрісінің жоқ болуымен газдардағы электрондар атомдармен (молекулалармен) өзара соқтығысып олар тәртіпсіз қозғалысқа келеді, жылдамдық бойынша Максвелдік таралады. Бұл газдардағы электрондардың орташа энергиясы ретінде оның температурасын *Те*  және электрондардың орташа квадраттық жылдамдығын қолдануымызға болады.



Маңызды айта кететін жайт, газдардағы электрондар мен атомдардың арасында кинетикалық энергияның ауысуы болғандықтан, бұл тәртіпсіз қозғалыстағы бөлшектердің температурасы (ішкі өрістің болуынан) газдың температурасына тең болуы керек.

Берілген газ көлеміне электр өрісін енгізілгендіктен электрондардың қозғалысы өзгереді. Кеңістіктегі электрондардың траекториясы ара тәріздес болып бейнеленеді, соңғы этапта әрбір электрон электр өрісінің күш сызықтарымен араласады.

Күрделі хаосты бағытталған электрондардың бағытталған қозғалысының талдауын жеңілдету үшін, оларды екі тәуелсіз құрамдас бөлікке бөледі: *тәртіпсіз және бағытталған* қозғалыс.

Бағытталған қозғалыстағы заряд тасымалдаушыларда электр өрісі пайда болғандықтан оларды көбіне дрейфтер деп атайды. Газдардағы атомдар электрондармен үздіксіз тебілуде болғандықтан, қозғалыс үдемелі емес, кеңістіктегі қозғалыс секілді. Бөлшектердің орташа жылдамдығы шамасы электр өрісінің кернеулігіне *Е,* ал бағыты өрістің күштік сызығына сәйкес келеді. Мұндай сипаттамадағы тәуелділікті қарастырайық. Бұл үшін массалары бірдей электрондардан бір электронды таңдап аламыз, бірақ оның «орташа қасиеттерін» жазамыз, яғни электрон тәртіпсіз қозғалады деп санаймыз, барлық уақытта бірдей бағыты және жылдамдығы бар, электрондардың тәртіпсіз қозғалысының орташа жылдамдығы мынаған тең:  атомдар өзара соқтығысқаннан кейін барлығы бірдей жол жүреді, электрондардың еркін жол жүруінің орташа ұзындығы мынаған тең болады:  .

Шарт бойынша газ қысымы айтарлықтай үлкен, ал электр өрісінің кернеулігі салыстырмалы түрде аз. Бұл жағдайда электрондардың тәртіпсіз қозғалысы дрейфке ие болады:  электронның толық жылдамдығы тәртіпсіз қозғалыс жылдамдығымен ауыстырылады. Онда τ уақытта жүретін электронның еркін қозғалысы

 (1.10)

Электронға электр өрісі тарапынан *F=-eE* күші *x* бағыты бойынша өрістің күштік сызығының бағытымен әсер етіп, τ уақытта ол *Δх* арақашықтыққа орын ауыстырады. Газ атомымен соқтығысқан электрон өз қозғалыс бағытын өзгертеді. Олай болса, *Δх* шамасына тең үдемелі қозғалыс теңдеуінен табуға болады: Δ*х*=*aτ2/2.* электрон массасын *me* ал *а*  үдеуін *F=-eE* күші арқылы өрнектеп



Дрейфтің орташа  жылдамдығын, орын ауыстыру арақашықтығы Δ*х –*ті,электронның еркін жүру уақытына τ бөлу арқылы табамыз. (1.10) формуланы ескеріп мынаны аламыз



Осылайша электронның қозғалысының бағытталған жылдамдығы электр өрісінің *E* кернеулігіне тура пропорционал болады:

 (1.11)

*ke*  электронның пропорционалдық коэффициенті деп аталады, мына *қозғалыс* теңдеуден табамыз

 (1.12)

* бұл Ланжевен қозғалыс теңдеуі деп аталады.

(1.11) теңдеудегі «минус» таңбасы қозғалыстағы электронның электр өрісіндегі ***Е*** кернеулік векторымен қарсы бағыттағы қозғалыс бағытын көрсетеді.

Электронның еркін жол жүруінің орташа ұзындығы келтірілген *p0* газ қысымына кері пропорционал екенін ескеріп 1.12 теңдеуді мына түрде жазуға болады.



Мұндағы: *ke0* – бірлік газ қысымындағы электронның қозғалысы.

**1.3 Газдағы электр разрядының ВАС-ы**

Плазма бөлшектері қозғалысын мынадай қарапайым екі түрге бөлуге болады: бейберекет және бағытталған, соңғысы электр өрісі әсерінен болады. Бұл қозғалыстың қай түрде болатыны электр өрісі кернеулігінің газ қысымына қатынасымен *Е/р0* анықталады, егер қатынас үлкен болса бағытталған, ал кіші болса бейберекет қозғалыс болады. Газдағы электр разряды *өздік емес* және *өздік* болып бөлінеді.













**Сурет 1.3.1** – Солғын разрядты алу эксперименталдық схемасы

Өздік емес разряд электр разряды деп аталады, катодтағы электрон эмиссиясына қажетті әсерді немесе ішкі факторлардың әсерінен (катодты қыздыру, рентген немесе радиоактивті сәулелер және т.б.) жасалатын разрядтың аралығындағы зарядталған бөлшектер.

Егер екі электроды бар разрядтық түтікшені газбен толтырып, жоғары тұрақты кернеу көзі *Еа* мен оны реттеуге арналған реостат *Rб* бар электр тізбегіне жалғасақ (сурет1.1), түтікшеден өтетін ток шамасына тәуелді әртүрлі разрядтар пайда болады. Разрядтар бір – бірінен электродтар мен газ көлемінде болатын физикалық процестермен, жарқырау сипатымен және электродтар арасындағы кернеудің түсуімен Uа ерекшеленеді.





















**Сурет 1.3.2** - Газдағы электр разрядының вольт - амперлік сипаттамасы

1.2-суретте әр түрлі разрядтардың вольтамперлік сипаттамасы көрсетілген. *0а* аралығы өте аз токта (А) пайда болатын өздік емес қараңғы разрядқа ал *ab*аралығы өздік разрядқа сəйкес келеді. Ток осіне параллель *cd* аралығы түтікше бойыменағатын токтын бірнеше жəне ондаған миллиампер шамасына тең болатын қалыпты солғын разрядты сипаттайды. Токты ары қарай өсіре берсек *de* аралығында аномаль разряд пайдаболады. Токтың бірнеше жəне жүздеген ампер шамасында доғалық разряд пайда болады (*fg* аралығы). Қисықтың (кернеудің) төмен түсетін аралықтары орнықсыз ауыспалы разрядтарға сəйкес келеді, (*bc*) қараңғыдан солғынға жəне (*ef*) аномаль солғыннан доғалыққа.

Сұрақтар

1. Газда электр тоғы пайда болу үшін қандай әрекеттер қолдануға болады?
2. Разряд деген терминді қалай түсіндіруге болады?
3. Разрядтардың әр түріне қысқаша сипаттама берріңіз
4. Газдағы електрондардың еркін жолы неге тәуелді?
5. Солғын разрядты алу үшін эксперименталды схеманы сипаттап беріңіз
6. Газдағы электр разрядының вольт - амперлік сипаттамасын қарай отрырып қандай нәтижелер жасауға болады?

**2-ТАРАУ. СОЛҒЫН РАЗРЯДТЫҢ ТЕОРИЯСЫ**

**2.1 Ионизация коэффициенттері. Газдық күшейту теңдеуі**

Егер газдық разряд түтікшесінің электродтарына біртіндеп көбейе беретін кернеу түсірсек, кернеу шамасы бірлік вольт шамасында тез қанығатын ток пайда болады, өйткені, сыртқы факторлар əсерінен болатын көлемдегі заряд тасымалдаушылар концентрациясы мен катодтағы эмиссия тоғының тығыздығы өте аз. Қанығу тоғының тығыздығы шамамен 10-14 -10-12 А/м2.Бұл токтың өту процессі вакуумдық диодтағыға ұқсас, айырмашылығы бұл жерде заряд тасушыларға газ атомдары кедергі жасайды.

Алайда, егер электродтарға түсірілген кернеу шамасын одан əрі жоғарылата берсек, иондалу потенциалы *Ui* шамасына жеткенде ток тағы өседі. Бұл құбылыс газды соққымен иондау процесі негізінде болады жəне оны газдық күшейту құбылысы деп атаймыз. Бұл құбылысты алғаш 1888 жылы орыс ғалымы Столетов өзінің фотоэлектрондық эмиссия құбылысын экспериментте зерттеу кезінде байқаған болатын. Ол мына заңдылықты орнатты, əрбір газ, газдық күшейту максимал болған кездегі электр өрісі кернеулігінің газ қысымына қатынасын көрсететін қандай-да бір тұрақтымен сипатталады, яғни,  Столетов тұрақтысы деп аталады. Бұл құбылысты кейін Таунсенд электрондық көшкіндерді, олардың дамуын экспериментте зерттеп жəне сəйкес теориясын жазып толығырақ түсіндірді (1902 жылы). Бұл эксперименттің мəні мынада, *Uа* потенциалдар айырымы түсірілген газдық ортадағы жазық параллель екі электрод арасында болатын процесті қарастырайық (2.1 сурет).









б)



а)



+

-

-

-

-

-

-

+

+

+

+

-

+

-

-

-

+

-

+

-

+

**Сурет 2.1.1** Электронды көшкіннің пайда болу механизмі және потенциалдың таралуы

Алдымен келесілерді мүмкін деп қабылдайық:

а) газдық күшейту құбылысына қарамастан, электрондар мен иондардың концентрациясы электродаралық кеңістікте көп болмайды, сондықтан потенциалдың таралуы түзу сызықты болады яғни көлемдік зарядпен бұрмаланбайды, демек өріс кернеулігі барлық нүктелерде бірдей (2.1б сурет):

*E=-Ua /d* (2.1)

мұндағы *d* - электродтар ара қашықтығы.

ə) өріс кернеулігі жеткілікті көп (ол *Uа* -дың үлкен мəні мен d -ның салыстырмалы түрде аз болуынан), ал газ қысымы р0 салыстырмалы түрде төмен. Бұл, қатынасы үлкен жəне электрондар мен иондар қозғалысы бағытталған екенін білдіреді.

Иондану дегеніміз-әр түрлі факторлар әсерінен газ молекулалары мен атомдары оң және теріс зарядталған бөлшектерге ыдырауы, яғни газдардың иондалуы. Иондардың пайда болу процесі газдың иондалуы деп аталады. Иондалу кезінде кейбір молекулалар электрондарынан айрылып, оң ионға, ал босап шыққан электрон теріс еркін заряд тасушыға айналады. Алайда, көбінесе, бұл электрондар бейтарап молекулаға «жабысып» теріс зарядталған иондар түзеді.

Сыртқы факторлар əсерінен, катодтан əрбір секунд сайын электрон шығады делік. Олар электр өрісінде жүйтки отырып энергия жинап, соқтығысу кезінде атомды иондасын. Осы кезде пайда болған оң иондар катодқа қарай, ал электрондар (катодтан шыққан жəне иондау процесі кезінде пайда болған) анодқа бағытталады. Энергия жинай отырып электрондар атомды тағы иондайды. Осылайша электронды көшкін пайда болады (2.1. а сурет). Бұл, катодтан қандай да бір *x* қашықтықтағы қимадан (2.1 ә сурет), əрбір секундта *vex* электрон өтеді дегенді білдіреді, сонымен қатар *vex>veк*. Катодтан *x+dx* қашықтықтағы қимадан, *vex+dvex* электрон өтеді, мұндағы *dvex*, қалыңдығы *dx*. Газ қабатында пайда болатын электрондар саны.

Таунсенд, электрон 1 метр жолында қанша иондау болдыратынын анықтайтын, көлемдік иондау коэффициенті (немесе Таунсендтің бірінші иондау коэффициенті) α деген ұғым енгізді. *dx* жолда əрбір электрон *αdx* иондау жасайды, ал негізінде *х* қимасы арқылы *vex* электрон өтеді, олай болса

 (2.2)

Айнымалыларды бөліп келесіні аламыз,

 (2.3)

Анодқа келетін электрондар санын табу үшін (2.3) теңдеуінің сол жағын *veк* -ден *vea* –ға дейін, ал оң жағын 0 -ден d -ға дейін интегралдаймыз.

 (2.4)

Көлемдік иондау коэффициенті α, 1 м жолда электрондардың атомдармен соқтығыс санына жəне еркін жүру жолында электрон жинайтын энергияға, яғни электр өрісінің кернеулігіне *E* тəуелді. Орташа еркін жүру жолының ұзындығы мен электр өрісі кернеулігі тұрақты, *x* кординатасынан тəуелсіз, яғни көлемдік иондау коэффициенті α -да тұрақты, демек интегралдау нəтижесі төмендегідей болады

 (2.5)

немесе

 (2.6)

Соңғы теңдеудің екі жағын да электрон зарядына көбейтіп анодтағы электрондық ток пен катодтағы электрондық эмиссия тоғы арасындағы байланысты табамыз:

 (2.7)

Бұл формула 1902 жылы Таунсенд жетекшілігімен жасалған эксперимент нəтижесі. Катодтан кеткен электрондар (кез-келген эмиссия түрінде) аз энергияға (шамамен бір немесе оның бөлігіндей электронвольт) ие, демек, олар газ атомдарын бірден иондай алмайды. Алдымен электрондар электр өрісінде қозғалып *eUi* тең немесе одан үлкен энергия жинау керек, ол үшін олар қандай да бір жол *di* жүру керек. Болжам бойынша электрон бұл жолды атоммен соқтығыссыз, энергия жоғалтпай өтеді, яғни *diE=eUi* немесе

 (2.8)

(2.6) теңдігін ескеріп

 (2.9)

Катодқа жақындағанда,  иондар одан  электронды қағып кетеді. Осылайша, екінші тасқын электрондардың  катодтан шығу емес, +нәтижесінде пайда болады. (2.9) ескеріп

 (2.10)

Анодтың екінші тасқыннан өту нәтижесінде электрондар жетеді:

 (2.11)

Екінші тасқында пайда болған иондар саны

 (2.12)

Аналогиялық түрде былайша жазуға болады:

 (2.13)

Анодқа жеткен электрондар саны

 (2.14)

Жазылған теңдеулерді талдап, тасқын кезінде анодқа жеткен электрондар саны

 (2.15)

- бөлшектік және өте кішкентай шама екенін ескерсек, яғни қатардың оң жақ бөлігіне ұқсайды. Оның мүшелерінің қосындысы  болғанда бірнеше соңғы мәнге ұмтылады:

 (2.16)

Электрондардың сандырының кейбір соңғы мәндерінің орнықты мәндері анодқа жетеді:

 (2.17)

Осы құбылысты ескеріп күшейтілген газ теңдеуін былай жазуға болады

 (2.18)

Осыдан *Iек* катодтағы толық ток болып табылмайды, сыртқы факторларды туғызатын электрондық компоненті болатынын ескере кету қажет. Катодтағы толық ток анодтағы *Iеа* тең яғни электронның есебінен болатын айтарлықтай үлкен *Iек* тоғы.

Келесі ескерту жасауға тура келеді «екпінді» аймағында электронның болуымен, олардың «электр өрісінде теңдікте болуымен» аймағына кіруімен (2.18) теңдеуге сәйкес келеді. Экспонентаның көрсеткішін жазғанда *a(d — di)* шамасы тұру керек.

**2.2 Біртекті емес өрістегі газдық күшейту**

(2.7) жəне (2.18) газдық күшейту формуласы электродтар арасындағы потенциалдың таралуына көлемдік зарядтың əсерін елемей жазық электродтарға қолдануға болатындай етіп шығарылған, яғни электр өрісі біртекті деп қарастырылған, демек, α коэффициенті координатқа тəуелсіз тұрақты дегенді білдіреді. Жалпы жағдайда электродтар арасындағы электр өрісі геометриялық факторлар, сонымен қатар электрондар мен иондардың көлемдік заряды əсерінен біртекті болмауы мүмкін. Осы жағдай үшін газдық күшейту теңдеуін қарастырайық.









**Сурет 2.2.1** -Коаксиал цилиндрлік электродтар жүйесі (Біртекті емес электр өрісіндегі газдық күшейту теңдеуін қорытып шығару үшін)

Коаксиал цилиндрлік электродтар жүйесін алайық (2.2 сурет), радиусы r1 ішкі цилиндр катод, ал радиусы r2 сыртқы цилиндр анод болсын. n -інші көшкін жүргенде катодтан Nekn электрон шықсын делік.

Электродтар арасындағы кеңістіктен радиусы *r*, қалыңдығы *dr*, ұзындығы 1 м цилиндрлік қабат қарастырайық. Иондау кезінде бұл қабаттағы электрондар санының өсімі қалыңдығы *dr*, ұзындығы 1 м цилиндрлік қабат қарастырайық .

Иондау кезінде бұл

 (2.2.1)

байқаймыз, электр өрісінің біртексіздігі α коэффициентінің r координатқа тəуелділік шартына байланыста болып тұр. Шекаралық шарттарды ескере отырып r=r1, жəне (2.2.1) теңдеуден мынаны аламыз.

 (2.2.2)

есептей отырып,  катодтан шыққан электрондар санын тауып, n –інші көшкінде пайда болатын иондар санын анықтаймыз

 (2.2.3)

 көшкін басталғандағы катодтан шығатын электрондар саны (сыртқы факторлар əсерінен болатын эмиссияны ескеретін болсақ),

 (2.2.4)

Электрон-ионды көшкін бірнеше рет өткен соң аралықтағы ток тұрақтанады, яғни əрбір келесі көшкін, өткенді қайталайды. Бұл (2.2.4) теңдеудегі деп қабылдап орнатылған режимдегі катодтан шығатын электрондар санын табуға мүмкіндік береді:

 (2.2.5)

Бұл теңдеуді қолдану үшін электродтар арасындағы кеңістіктегі көлемдік α иондау коэффициентін және өріс кернеулігінің өзгеру заңдылығын білу қажет.

**2.3 Көлемдік иондау коэффициентінің электр өрісі кернеулігі мен газ қысымына тәуелділігі.**

Көлемдік иондау коэффициенті электр өрісі кернеулігіне жəне электродтар аралық кеңістіктегі газ түрі мен қысымымен анықталатын электронның еркін жүру жолының орташа ұзындығына тəуелді

 (2.3.1)

Осыдан

 (2.3.2)













**Cурет 2.3.1** - Иондалу ықтималдылығының электрон энергиясына тәуелділігі

Орташа еркін жүру жолында электрон -ге тең немесе одан көп жол жүру ықтималдылығы келесіде көрсетілгендей анықталады

 (2.3.3)

Иондау ықтималдығының  электрон энергиясына тəуелділігінің күрделі сипаты есептеулерде қиындықтыр тудырады.

α –ның Е және р бойынша тәуелділігі осы себептен Таунсенд бұл тəуелділікті сапалы түрде бағалау үшін кейбір қателіктерді ескермей энергиясы *eUi асатын электрондар үшін ωi* = 1 деп алды. Бұл кезде теңдеу келесідей болады

 (2.3.4)

(2.3.3) мен (2.3.4) қолданып мұны былай жазуға болады

 (2.3.5)

-ны  деп алып жəне газ қысымын  қойып мынаны аламыз

 (2.3.6)

немесе (Таунсендтің иондау коэффициенті үшін жартылай эмпирикалық формуласы)

 (2.3.6)

Мұндағы *С1=1/λе0=Qe0* және С2 =*Ui/λe0=UiQe0. Газ тегіне байланысты тұрақтылар*

0 150 300 450 600 750



7,5

6

4,5

3

1,5



**Сурет 2.3.2** - Көлемді α иондалу коэффициентінің тәуелділігі

Электродқа салыстырмалы түрде Uа кернеуі жиналсын. Уақыттың алғашқы кезеңінде электродтар арасында потенциалдардың таралуы сызықты болады, яғни біртекті электр өрісінің кернеулігі орнығады E= Ua/d1 ( 1 түзу сызық, 2.5.1, б сурет).Бұл кернеуліктің кейбір α көлемдік иондау коэффициенті 2.5.2 суретке сәйкес келеді. Ua, мәні мәні артқан сайын сәйкесінше E және α мәні кіші болады, және мынадай теңдікте γ(*еаd*— 1) < 1 ие болады, яғни түтікшеде әлсіз газдық күшейтумен салыстырмалы түрде тәуелсіз разряд пайда болады. Бұдан көлемдік заряд және стационарлы режим орнағаннан кейін электродтар арасындағы потенциалдың таралуы сызықты түрде сақталады.

**2.4 Өздік разряд пайда болу үшін кернеудің қысымға тәуелділігі**

Газдық күшейту теңдеуін қорытындылағанда γ шамасының аз жəне αd мəні онша үлкен болмағандықтан γ(еαd—1) < 1 деп қарастырғанбыз. Бұл

 (2.18)

теңдеуінің бөлімі бірден аз, оң соңғы шама екенін білдіреді. Егер (2.18) теңдеудегі ток Iek шамасын азайтатын болсақ (сыртқы факторлар əсерімен, мысалы каттодтық эмиссия тоғын өзгертіп), онда анодтық ток та азаяды. Iek=0 болғанда Iea=0 болады, өздік емес разрядқа тəн сипат. Егер Iek мəнінің шамасын өзгертпей, электрондардың иондағыш қабілетін өсіретін болсақ (бұл газ қысымы мен электр өрісі кернеулігін өзгерту жолымен жүзеге асады), онда анодтық ток өседі, яғни, (2.31) теңдеудің алымындағы eαd өсуі мен бөліміндегі 1- γ(еαd—1) азайуынан болады. Алайда, γ(еαd—1) < 1 теңсіздік орнап тұрғанда, анодтық ток катодтық эмиссиялық ток əсерінен болады, яғни разряд өздік емес деген сөз.

Егер α коэффициентін үлкейтетін болсақ (мысалы, электродтарға түсірілген кернеуді көбейту арқылы), онда бөліміндегі γ(еαd—1) мүше бірге тең болады, ал барлық алым нөлге теңеседі, онда мына шартта Iek=0 (2.31) теңдеудің оң жағында анықталмағандық пайда болады. Iek ең кіші соңғы мəнінде,өте үлен анодтық Iea береді. Физикалық тұрғыдан, анодтық ток тіпті сыртқы факторлар əсерінен, эмиссия кезінде пайда болатын электрондарсыз ақ байқалатынын білдіреді. Электрон-иондық көшкіні күшті болғаны соншалықты, тіпті разряд, катодтан электрондар эмиссиясы иондар соққысымен пайда болып, ұсталып тұрады. Сонымен өздік емес разрядтың өздікке айналуын сипаттайтын математикалық теңдеу төмендегідей.

γ(еαd—1)=1 (2.4.1)

(еαd—1) - өрнегі, катодтан бір электрон шығу нəтижесінде көлемде пайда болатын иондар саны көрсетеді. Ал γ(еαd—1) - туындысы осы иондық көшкін соққысымен катодтан туатын электрондар саны. Сонымен, өздік разряд шарты келесідей қарапайым физикалық мағынаны береді: егер катодтан шыққан бір электрон, катодқа соқтығып кем дегенде қайтадан бір электрон шығаратын иондар тудырса, разряд өздік деп аталады.

Өздік разрядтың пайда болу кернеуінің *pd* ( p -газ қысымы, *d* –электродтар арасындағы ара-қашықтық) көбейтіндісінен тəуелділігін қысымның кең ауқымында эксперименттік түрде, Таунсенд теориясына дейін 1989 жылы Пашен алған (Пашен заңы). Пашен заңы жеке жағдайда газдық разрядтың ұқсастық заңына сəйкес келеді, яғни разрядтағы құбылыстар *pd*  көбейтіндісі тұрақты болып қалса, ұқсас болады.

**Пашен заңы**

Біртекті өрістегі өздік разрядтың пайда болу шарты төмендегідей

γ(еαd—1)=1 (2.4.2)

немесе,

 (2.4.3)

(2.4.3) логорифмдеп α қатысты түрлендіріп мынаны аламыз,

 (2.4.4)

Ал экспериментте былай анықталған

 (2.4.5)

α үшін (2.4.4) пен (2.4.5) теңдеулерін теңестіріп мынаны аламыз

 (2.4.6)

немесе,

 (2.4.7)

Логорифмдесек



(2.4.8)

U=Unp екенін ескерсек

 (2.4.9)

Unp - разряд пайда болатын кернеу. Осы соңғы теңдеуден көріп отырғандай, температураның өзгермейтін мəнінде, біртекті өрісте разрядтық кернеу қысым P туындысы мен d электродтар ара-қашықтығының функциясы болып табылады яғни,

 (2.4.10)

Бұл заңдылықты алғаш экспериментте Пашен алған, осы себептен (2.4.10) формула Пашен заңы деп аталады.

Физикалық ұсыныстарды қолдана отырып бұл графиктегі қисықты былай түсіндіруге болады (сурет 2.4.1). const =d болғанда, минимумға сəйкес келетін мəннен қысымды жоғарлатсақ, онда ол электрондардың атомдармен соқтығысу санының көбейуіне əкеледі, осы себептен, еркін жүру жолында электрон жинайтын энергия азаяды. Демек, соққы əсерінен иондалу процесі жүру үшін кернеуді Unp үлкейту керек.

Қысымның минимумға сəйкес келетін мəнінен төмен кезінде электронның еркін жүру жолы мен, осы кезде жинайтын энергиясы өседі, бірақ, соқтығысу саны азаяды, демек, соққы кезінде болатын иондалу ықтималдылығы да азаяды. Осыны көбейту үшін соқтығыстар иондалумен аяқталу керек, ол үшін электронның еркін жүру жолында оның энергиясын үлкейту керек, яғни, Unp үлкейту керек.













Hg

Aг

ауа

Ne



**Cурет 2.4.1** -Кейбір газдар үшін Пашен қисығы

(2.4.10) формула түріндегі Пашен заңы қалыпты температурада дұрыс болады. Температураның өзгеруі қысым өзгеруіне кері əсерін тигізеді жəне мұны есептеулерде ескеру қажет, яғни, ол кезде Пашен заңы төмендегідей жазылады,

 (2.4.11)

немесе,

 (2.4.12)

Бұл жерде  (T - температура Кельвин градусында)

Онда

 (2.4.13)

Мұндағы:

Uпрд -өлшеудің нақты шартына келтірілген өткізгіш кернеу, Uпрр -Пашен формуласымен есептеу кезінде алынған өткізгіш кернеу.

Пашеннің эксперименттік қисықтарын, есептеу кезінде шығатын нəтижелерінен pd мəнінің аз аймақтарында, сонымен қатар үлкен аймақтарында да ауытқиды (қателіктер кетеді). *pd*  өте аз мəні кезінде шығатын қателіктер, бұл кезде вакуумдық өткізуде болатын электрод бетінде болатын процестер (эмиссиялар) əсерінен деп түсіндіріледі. Ал *pd* үлкен мəніндегі қателіктер, электрод бетіндегі микро ұштарда электр өрісі кернеулігінің үлкейуі мен көшкіннің пайда болуының ықтималдылығының көбейуімен түсіндіріліді. Бұл кезде U төмендейді.

**2.5 Электрод аралық кеңістіктегі разрядтардың жиналуы, разрядтың дамуы**

(2.18) газдық күшейту теңдеуінен шығатындай, өздік разрядтың пайда болу шарты орындалған кезде γ(*еаd*— 1) = 1, анод тоғы *Iea, катодтың өте аз эмиссиялық тоғында да Iек* шексіздікке дейін өсуі керек. Егер мынандай шарт γ(*еаd*— 1) > 1 жасайтын болсақ, онда теңдеу мағынасыз нəтиже береді – мысалы анод тоғының теріс мəні. Мұның физикалық мағынасы мынада, (2.18) теңдеуде көлемдік заряд жоқ деп есептеп қорытылған, демек, электродтар арасындағы потенциалдың таралуы, разряд аралығындағы токтың барлық көбейу этаптарында өзгеріссіз қалады. Бұдан басқа разряд өздік еместен өздікке ауысқанда (мысалы, анод кернеуін *Ua* көбейту нəтижесінде), токтың көбейуі электродтар арасындағы электр өрісіне əсер ететін жəне электрондық көшкіннің өту шартын өзгертетін электрондар мен иондардың көлемдік зарядтарының пайда болуына əкеледі. Осы себептен, өздік разрядтың пайда болуы мен дамуындағы процесстерге талдау жүргізу үшін, разряд көлемінде берілген нүктедегі потенциал мен осы нүктедегі компенсациаланбаған көлемдік заряд тығыздығын байланыстыратын Пуассон теңдеуін қолдану керек. Бұл жағдайды қарапайым жазық параллель электродтар үшін қарастырайық. Пуассон теңдеуі, көлемдік электрондары мен оң иондары бар жазық параллель электродтар үшін мына түрде болады

 (2.5.1)

Бағытталған электрондық жəне иондық токтар тығыздығын енгізіп мынаны аламыз

,  (2.5.2)

Бұл жерде бөлшектің бағытталған қозғалыс жылдамдығы осы кезде өткен потенциалдар айырмасымен емес, электр өрісі кернеулігінің қозғалыс заңдылықтарымен анықталады:

, (2.5.3)



Мұны (2.5.1) қойып төмендегідей дифференциалдық теңдеу аламыз

, (2.5.4)

бұл *Роговский теңдеуі* деп аталады.

Бұл теңдеуге кіретін бағытталған токтар тығыздығы *jiH* жəне *jeH* тұрақты емес, оларбір нүктеден екінші бір нүктеге дейін өзгеріп отыратынын ескеру керек. Бұл жердетұрақты электрондар мен иондар суммасынан тұратын толық ток тығыздығы. Осытоктардың қосындысы анодтық ток тығыздығына *ja* тең екені белгілі. Олай болса, тағыбір теңдеу шығады:

*JiH* + *jeH = ja*= const. (2.5.5)

Көріп отырғанымыздай екі теңдеуден шығатын теңдеу шықты. Бұл теңдеулерге *x* координаттың функциясы болатын үш белгісіз шама кіріп тұр U,*jiH* жəне *jeH*. Осы себептен есеп жалпы жағдайда шешуге келмей тұр, өйткені жеткіліксіз теңдеу тек қана экспериментте немесе физикалық процесстерді талдау кезіндегі өздік разрядтың нақты немесе арнайы түрін қарастыру арқылы табу мүмкін болады. Олай болса, енді электрод аралық кеңістікте зарядтардың жиналу процесін сапалы түсініп жəне стационар разрядтың болуын қарастырамыз. Стационарлы разрядтың пайда болу шарты







- +





-

-

+

+

+

+



a)











5 4 3 2 1

A



ә)

0

**Cурет 2.5.1** - Солғын разрядтың пайда болу механизмі:

а) плазма қабатының пайда болуы, ə) электродтар арасындағы потенциал таралуының өзгеруі

Катод К жəне анод А екі жазық электроды бар ауа толтырылған түтікшені қарастырайық (2.5.1а сурет). Бұл кезде газ қысымын р0=1 Па деп алған ыңғайлы, өйткені масштабты қайта есептемей ақ, көлемдік иондау коэффициентінің α электр өріс кернеулігінен E тəуелділігін бірден алуға болады (2.5.1, ə сурет).

0 150 300 450 600



7,5

6

3























**Cурет 2.5.2** - Газ (ауа) қысымы р0=1 Па болған кездегі *а(Е)* тəуелділігі

Электродтарға салыстырмалы түрде көп емес кернеу *Uа* түсірейік. Алғашқы уақыт моментінде электродтар арасындағы потенциалдың таралуын білетініміздей сызықты болады, яғни *E=Ua/d1*, біртекті электр өрісі орнығады (2.5.1, ə суреттегі бірінші түзу). Бұл кернеулікке 2.5.2 сурет бойынша қандай да бір көлемдік иондау коэффициенті α сəйкес келеді, өйткені *Ua* шамасы ізінше *E* жəне α өте үлкен емес, мына теңсіздікті γ(*еаd*— 1) < 1 қанағаттандыратын болады, яғни түтікшеде əлсіз газдық күшейтуі бар өздік емес разряд пайда болады. Бұл, көлемдік заряд, стационар режимді орнатқан соң да өзгеріссіз қалады жəне электродтар арасында потенциал сызықты түрде таралатынын білдіреді.

Кернеу *Ual* болғанда (*Ua.в.р.* - разрядтың пайда болу кернеуіне тең немесе одан көп кезде), кернеулік *E1=Ual/d1* көлемдік иондау коэффициенті α = α1 жəне осыдан көретініміздей өздік разрядтың пайда болу шартын келеді . 2.5.1, а суретте катодтан *d2* қашықтықта шекараланған плазма қабаты орналасқан. Плазма қабатының пайда болуы нəтижесінде электродтар арасындағы потенциалдың таралуы алғашқы жуықтауда 2.5.1, ə суреттегі 3-ші қисықты береді. Плазма жоққа жақын жерде потенциал қисығы сызықты түрде өседі, ал плазма бар жерде көлденен түзуді береді.

Газдық күшейту процесі кезінде катодтан электрондардың эмиссиясын тудыратын сыртқы факторлар үздіксіз əсер ететінін білеміз. Қазір де катодтан электрондардың кейбір ағыны veк1 осының əсерінен болады деп ұйғарамыз, бірақ ол кездейсоқ сипатқа ие жəне тек қана алғашқы көшкіннің тууына сетпігін тигізеде, ал қалған көшкіндер катодтағы γ -процессі нəтижесінде болады.

Егер алғашқы көшкін пайда болғанда катодтан ν электрон шықса, анодқа  электрон жетеді, онда, анод маңайындағы көлемде пайда болып жəне плазманы тудыратын иондар саны мынандай болады,

 (2.5.6)

Екінші көшкін пайда болу кезінде бұл иондар γ -процессі нəтижесінде катодтанэлектрон шығарады:

 (2.5.7)

Бұл электрондар электр өрісінде қозғала отырып электрон-иондық көшкін дамытады, 2.5.1, ə суреттегі 3-ші қисық жəне E2 = Ua1/d2 кернеулікті сипаттайды. Е2 кернеулік α2 көлемдік иондау коэффициентіне сəйкес келеді. Осылайша, екінші көшкін кезінде анодқа жеткен электрондар саны мынандай болады,

 (2.5.8)

ал катодқа жеткен иондар саны,

 )

Осылардан екінші көшкін кезінде пайда болған иондар санының бірінші көшкін кезінде пайда болған иондар санына қатынасын табайық, оны иондалудың өсу коэффициенті μ деп атаймыз:

 (2.5.10)

Енді γ=μ шамасы жаңа мағынаға ие болды. *μ = l* кезінде, келесі көшкін өткенді қайталайды, яғни ток уақыт бойынша өзгеріссіз қалады, ал *μ> 1* кезінде, келесі көшкін өткенге қарағанда көп ион тудырады, яғни электродтар аралық кеңістікте, шекарасы анодтан катодқа қарай ығысқан плазма пайда болады*. μ< 1*кезінде разряд өшеді. Осылайша *μ = l* шарты*, стационар разряд шарты болып* саналады. Разрядтың əрі дамуына талдау жүргізейік.

Егер a нүктесіне (2.5.2 суретті қара) α1d1 жəне γ = 1 сəйкес келсе, онда екінші көшкін α2d2 жəне μ2= γболады, b нүктесі. Сонда μ2 шамасы қандай болғаны? Бір жағынан d2< dl онда μ төмендеу керек, екінші жағынан α2>α1 онда μ өсу керек. Өріс кернеулігі *E, d* -ға кері пропорционал екенін, ал α коэффициенті ab аралығында E -ге пропорционал емес, күштірек өсетіндігін ескере отырып, мына қорытындыға келеміз α2d2>α1d1  жəне μ2>μ1. Осылайша келесі көшкін өткеннен көп болады жəне плазма шекарасы катодқа d3 қашықтыққа дейін ығысады (2.5.1, ə суреттегі 4-ші қисық). Бұл жерде де өткенге ұқсастырып мынаны айтуға болады, 3 α , 3 E , c нүктесі (2.5.2 суретті қара). иондалудың өсу коэффициенті μ өседі, яғни, μ3>μ2> 1, разрядтың дамуы жалғаса береді. Плазма шекарасының катодқа қарай əрі ығысуы кезінде, α коэффициенті E -ге пропорционал емес, əлсіз өседі жəне μ азая бастайды, бірақ кейбір уақытқа дейін -1-ден үлкен болады. Бұл дегеніміз разрядтың даму процесі баяулады деген сөз. Плазма шекарасы мен катодтың қандай да бір *d4* аралығында, 2.5.2 суреттегі *d*  нүктеге сəйкес, *μ* мына шамаға ие болады *μ4 = γ*. Бұл моментке стационар разрядтың орнығуы сəйкес келеді. Əрбір келесі көшкін өткенді қайталап разрядты ұстап тұрады. Бұл кезде түтікшеде орнығып тұрған разряд, солғын деп аталады.

Бұл разрядтың қараңғы разрядтан маңызды айырмашылықтарының бір разряд кеңістігінде электрондар мен оң иондардың елеулі көлемдік зарядтарының түзілуінен екі сипатты аймаққа бөлінуі. Өте қысқа қашықтыққа созылып жатырған, потенциалдың анағұрлым түсуі бір жерде топталған, катод маңайындағы аймақ.

0 200 400 600

1000

800

400



1200

600



200













**Cурет 2.5.3** - Ауа үшін әртүрлі қысымдағы α(Е) тәуелділігі

Бұл жер потенциалдың катодтық түсуі ΔUк деп аталады, ал аймақтың өзі потенциалдың катодтық түсуі аймағы деп аталады. Қалған кеңістік жоғары электр өткізгіштікке ие күшті иондалған газбен толтырылған – газдық разряд плазмасы, осы себептен бұл жерде потенциал градиенті жоғары емес. Бұл аймақ разряд бағаны деп аталады.

Солғын разрядтың пайда болу механизімін талдау кезінде катодтан электрондардың эмиссиясы γ -процессі əсерінен болады деп қарастырғанбыз жəне γ коэффициенті разрядтың түзілуі кезінде өзгеріссіз қалады дегенбіз. Шын мəнінде γ коэффициенті иондар энергиясына тəуелді, яғни, катод аймағындағы кернеулікті өсіргенде ол да өседі.

Сонымен қатар, потенциалдың катодтық түсуі аймағында кернеулікті өсіру, иондық соққылау əсерінен болатын екінші ретті эмиссиядан басқа, катодтың қызған аймақтарында электростатикалық жəне термоэлектрондық эмиссия пайда болуына əкеледі. Осы факторлар əсерінен эмиссияны күшейту, солғын кезінде разряд тұрақталмай əрі қарай дамып доғалық разрядқа айналуына септігін тигізеді. Осылайша, солғын разрядтың елеулі айырмашылығы, разряд стационарлы жанатын электродтар арасындағы кернеуді UГ,анодтың берілген тоғында автоматты түрде орнату болып табылады.

**2.6 Солғын разрядтың негізгі қасиеттері мен сипатаммалары**

Солғын деп - электрондар эмиссиясы, катодтан жылдам оң иондар соққысы нəтижесінде болатын тұрақты токтағы өздік разрядты айтамыз. Солғын разрядтың пайда болуын электродтары табақша тəріздес, диаметрі түтікше диаметірінің 2/3 тен 3/4 аралығына сəйкес келетін, ұзындығы диаметірінен шамамен 10-30 есе үлкен болатын түтікше арқылы бақылауға болады. Яғни алғашында атмосфералық қысымда болған түтікше көлеміндегі ауаны вакуумдық насоспен сирете отырып, мынаны бақылауға болады.

2.6.1, а суретте разрядтты түтікшедегі К катод пен А анод арасындағы разрядттың жарқылдаудың схематикалық бейнесі көрсетілген. 2.6.1, б – суретте разрядттың әртүрлі облысындағы жарықтылықтың жарқылдау қисықтығы келтірілген.

Катод айналасында жіңішке көзге байқалмайтын қараңғы қабаттың таралуы көрсетілген 1- Астонов қараңғы кеңістігі (бірінші катодты қараңғы кеңістігі). Оның соңында дәл сондай, өте жұқа жарқылдайтын пленка – 2 бірінші катодты жарқылдау, ары қарай 3 аудан екінші катодтық қараңғы кеңістік немесе Круксовты қараңғы аймақ деп аталады. Осы ауданнан кейін 4 солғын катодты жарқылдау кеңістігі таралады. Осы сипатталған жарқылдаулардың түрлері разрядттар деген атауларға ие болған.Солғын жарқылдауда байқалатындай катод тарапынан созылыңқы үлкен жарықтылық байқалады. Анодқа бағытталған жарықтылық бірқалыпты ауданда өтумен 5 Фарадей қараңғы кеңістігіне ауысады. Фарадей қараңғы кеңістігінен кейін 6 баған разряды таралып разрядтты түтікшенің азынаулақ бөлігін алады.



-

+



0

д)





0

г)





0

в)



0

б)



0

а)







6

7 8

1 2 3 4 5

**Cурет 2.6.1** -Солған разряд: а –разряд жануының картинасы; б – ұзын түтікшенің бойымен шырактың жарыктылығының таралуы; в, г, д –сәйкесінше көлемдік заряд тығыздығының және кернеулік потенциалының өріс бойынша таралуы

Кейбір шарттарда анодттың алдында 7 аудан жарқыраудың жарықтылығының төмендеуі байқалады – анодтты қараңғы аймақ, анодттың бетінде – анодтың жарқырау қабаты 8, байқалады.

Солғын разрядттың ерекшелігі электрод арасындағы арақашықтық азаюымен (мысалы, анодтың катодқа қарай жылжуынан) созылыңқы разряд бағандары толығымен жоғалып кеткенше азаяды. Разрядттың катодты бөлігі осыдан өзгермейді. Ары қарай анодттың қозғалуынан Фарадей қараңғы кеңістігі, кейін солғын жарқылдау жоғалады.

Разрядтағы газ қабатындағы қараңғы және жарық қабаттардың пайда болуын электродтар арасындағы потенциалдың таралу қисығының көмегімен түсіндіруге болады. (2.6.1,в сурет). Катодтан шыққан электрондарда, γ-процесінің әсерінен (катод ионының атқылауы есебінен болатын эмиссия, метастабильді және қозбайтын атомдар, фотоэлектронды эмиссия, разрядттың сәулеленуін туғызу), көп емес бастапқы жылдамдыққа ие болады. Сондықтанда олардың катод жанында жұқа газ қабатындағы атомдармен соқтығысуы тек қана серпімді болады. Атомның иондалуы мен қозуы бұл жерде болмайтын болғандықтан газдардың жарқырауы да болмайды.

2.6.1, г суретте ұзын разрядтты түтікшеде таралған көптеген ρ = ρi - ρe көлемдік зарядттың таралуы келтірілген. Плазмада мұндай шамалар нөлге тең болғандықтан абсолютті мәні рi және рe үлкен болады.

*Ei* потенциалының бойлық градиентінің шамасы, разряд бағанында автоматты түрде орналасып қабырға жанындағы жаңа зарядттың пайда болуы мен рекомбинациясын және зарядттың кетуін сипаттайды. Жіңішке түтікшелерде қабарға жанынан зарядттардың кетуі жоғары болып, *Еl* потенциалының үлкен градиенті орнығады және газ электронының жоғары температурасына *Те* ие болады, яғни интенсивті газ ионизациясы жүреді. Осыдан көптегенатомдардың қозуы пайда болады. Олардың жарқылдаулары жіңішке түтікше бағанындағы разрядттың жарқырауының себебінен болады.Түтікшенің радиусын арттыру, қабырғадағы рекомбинацияның әлсіреуіне алып келеді, электрондар мен иондардың рекомбинациясы мен пайда болу процесінің теңдігін бұзады. Бұл өз кезегінде *Еl* және *Те*, мәндерінің азаюына, разряд бағанындағы орныған жаңа иондау процесін әлсіретеді.

Бір уақытта қозатын атомдардың саны азаяды. Сондықтанда кең түтікшеде разряд бағаны толығымен жарқылдамайды. Разряд бағанына тән электрондар мен иондар балансы іс жүзінде толығымен өзара копменсацияланады ал олардың көлемдік заряды анод жанында бұзылады. Мұндағы оң иондардың катодқа қарай кетуімен, электр өрісінің әсер етуімен анодқа келген иондар компенсацияланбайды. Анодттың айналасында көптеген теріс заряд электрондары пайда болады және бұл аудандар потенциалдың артуымен *ΔUа* потенциалдың анодтқа құлау ауданына сәйкес келеді.

Жоғарыда қарастырған процестен мынадай қорытынды шығаруға болады, солғын разряд процесінің пайда болуы катод облысында жүреді. Разряд бағаны және Фарадей қараңғы кеңістігі, анод пен катод облыстарында байланысқан электрөткізгіштігі үшін пассивті өткізгіштің роліне ие болады.

**2.7 Солғын разрядтың ВАСын алу**

Солғын разрядттың катодының аумағында көлемдік зарядттар электрондар мен иондардың елеулі мәні бар, сондықтанда Роговский теңдеуінің негізгі теориясы (2.5.4) және бағытталған токтың иондық компоненттерінің электрон тығыздығының қатынасы үшін тиімді (2.5.5) болады.

Қосымша мәліметтер теңдеулер жүйесін құру үшін қажет болады: а) *U* потенциалының таралуы үшін эксперименталды қисық және солғын разрядтағы E электр өрісінің кернеулігін (2.6.1 суретті қараңыз, в, г), нақты көрсету үшін (тек катодты аудан үшін) 2.7.1-сурет а, б; б) µ=1 болған кездегі катодтың шеткі аудандарында көрсетілген разрядтағы стационарлы шарттың орындалуын.

Катодтық қабатта салыстырмалы түрдегі салқын катодта электрондық ток екінші ретті электрондық эмиссия əсерінен жəне иондық токтың өте аз бөлігінен пайда болады.Катодтық қабаттағы кернеулік өрістің өзгерісінің күрделі сипаттамасы есепті шығаруды қиындатады.Сондықтан катодтық қабаттағы солғын разрядты сипаттайтын процесс теориясын құрған кезде қисықты түзу сызыққа аппроксимациялайды (2.7.1,б суреттегі пунктир сызығы).

a)



















б)

**Cурет 2.7.1** - (а) потенциалдың таралуы және (б) катодтық қабаттағы солғын разряд

Онда катодтағы кернеулік өрісті Е0 және ұзындығы аймақтағы потенциалдың катодтық құлауы арқылы жазуға болады:

 (2.7.1)

Катодтық қабаттағы кернеулік өріске тәуелді және тең:

 (2.7.2)

Катодтың жоғарғы жағында орналасқан нүктелер үшін Роговский теңдеуі мына түрге айналады:

 (2.7.3)

Бұл теңдеуді (2.7.2) және (2.7.3) арқылы өрнектесек

 (2.7.4)

Электрондар катодтан -процесстердің жиынтығы нәтижесінде шығады. Бұл электрондық токтағы катод және катодтағы иондық токтың арасындағы тығыздықтарының қатынастарын жазуға мүмкіндік береді:. Бұл қатынасты (2.7.4) қойсақ

 (2.7.5)

Жақшаның ішіндегі екінші мүшені елемеуге болады, мұндағы  және . Онда теңдік  бұдан

 (2.7.6)

"минус" таңбасы анодтан терістен оңға бағытталған осіндегі катодқа бағытталған токты көрсетеді.

























**Cурет 2.7.2** – ВАС-тың теориялық тәуелділігі

Белгісіз  ұзындықты ескермей және  тәуелділікті табу үшін, катодтық қабаттағы солғын разрядта орындалатын  шартты пайдалануға болады. Газдағы қысым және кернеулік өрістегі алынған α коэффициентке жақын тәуелділікті қолданып,

 (2.7.7)

Шамамен алынған α коэффициентінің газ қысымына және өріс кернеулігіне тәуелділігін қолданып 2.7.7 теңдеуді былай жазамыз.

 (2.7.8)

















**Cурет 2.7.3** - Солғын разрядтағы катодтан құлау  потенциалының разрядты токка тәуелділігі

(2.7.7) және (2.7.8) теңдеудің біріккен шешімінен ізделіп отырған , тәуелділігін аламыз (сурет 2.7.2). Вертикалды және горизонталды остерінің масштабтарына кіретін А және В тұрақтылары, газдардың түріне катодтың материалына тәуелді және мынаған тең:

 (2.7.9)

 (2.7.10)

Осылайша қабылданған суреттің масштабындағы қисық әмбебап сипаттамаға ие.

 тәуелділігін катодтың *S* ауданындағы  тығыздығына көбейтіп разрядтты токтың катодтағы потенциалдың құлауына тәуелділігіне өтуге болады яғни (бірінші жақындауы, разряд бағанындағы кернеудің құлауын елемеу) вольт-амперлік сипаттамаға.

Шын мәнінде мұндай тәуелділік катодтың толық жану режиміне сәйкес келетін тек оң жақтағы қисық үшін дұрыс болады. тоғын азайтумен  және мәні де азаяды. Катод тоғының кейбір мәндерінде ток тығыздығы белгіленіп және катодтағы потенциалдың құлауы ең минималды шамаға дейін азаяды . Ары қарай катодтағы токты азайтып ток тығыздығын азайтпай, катодтың жалтырайтын ауданын азайту керек. Мұндай өзгертулер жарқылдау ауданы , тоғының өзгеруіне пропорционал, осылайша катодтағы ток тығыздығы өзгерусіз қалып және  тең болады. Катодтағы потенциалдың құлауы да өзгеріссіз қалып  тең болады. Солғын разрядттың – вольт амперлік сипаттамасы 2.7.3 - суретте көрсетілген. Сипаттамадағы ауданы *нормальды солғын разрядттың ауданы* деп аталады, ал - ауданы аномальды солғын разряд ауданы деп аталады.

Сонымен нормальды солған разрядттың сипаттамасы катодтағы *нормальды ток тығыздығының* тұрақтысын және катодтағы *нормалды потенциалдың құлауын*сипаттайды.

Сұрақтар

1. Разрядтың өсуі, электродтар арасысында зарядтардың сақталуын сүреттеңіз
2. Өздік және өздікемес разрядтар деген не?
3. Көлемдік ионизация коэффициентінің электр өрісінің кернеулігіне және газ қысымына тәуелдігін сипаттаңыз.
4. Столетов константалары қандай мағанасы бар?
5. Параллельді электродтаға арналған Пуассон теңдігін жазып, оның шешу әдістерін көрсетіңіз.
6. Газдағы электр разрядтың ВАС бойынша разрядтардың классификациялаңыз.
7. Өздік разрядтың пайда болу шарттарын келтіріңіз.

**3-ТАРАУ. ДОҒАЛЫҚ РАЗРЯДТАР**

**3.1 Өздік доғалық разряд. Доғалық разрядтардың түрлері**

Солғын разрядтағы потенциалдың катодты құлауы разрядтың жануы үшін екі бірдей маңызды үрдісті қамтамасыз етеді:

* катодтан шығатын электрондардың екпіні, оларға газ атомдарының ионизациясы үшін қажетті энергияның берілуі, электронды иондық ағынның дамуы;
* катодқа оң иондардың келуі, ионды бомбалау әрекетінің нәтижесіндегі екіншілік электрондар эмиссиясының жасалуы.

Қалыпты солғын разрядтан аномальдіге ауысу барысында және ары қарай токты  көбейткенде катодты потенциалдың  құлауы артады және ұзындығы кемиді . Бұл катодтық қабаттағы потенциал градиентінің өсуіне және осы себептен катодты бомбалайтын ион энергиясының артуына алып келеді. Бұл энергияның негізгі бөлігі катодқа жылу түрінде беріледі. Токқа жақын, вольт-амперлі нүктеге ұқсас (3.1.1-суретке қара), маңызды разрядты нүктелер катодты қыздырғанда айтарлықтай күшті болады. Табиғи әртектілі күшке және катодтың жеке қабаттарындағы салқындатудың әртүрлі шарттарына байланысты олардың бірі басқаларына қарағанда тез қызады да соның арқасында электрондардың қосымша санын шығарады.

Берілген қабаттағы эмиссияның артуы жергілікті ағынның қарқындырақ жасалуына алып келеді, және осыған орай ары қарайғы осы қабаты бомбалаушы иондар санының өсуіне де әсер етеді. Нәтижесінде разряд катодта өте ұсақ мөлшердегі дақ секілді топталады және ол катодты дақ деп аталады. Бұл жағдайда басымдылық көрсететіндер процесі емес термоэлектронды эмиссия болып табылады. Түтікте разрядтың жаңа формасы - өздік доғалық разряд орнатылады, оған 3.1.1-суретте көрсетілген электродтар арасындағы потенциалды үлестіру тән.













**Сурет 3.1.1** -Доғалық разряд бойындағы потенциалдың таралуы.

Солғын разрядтағыдай тікелей катод алдына орналасады, потенциалдың катодқа құлау қабаты. Алайда, егер солғын разрядта потенциалдың құлауы катод қабатындағы тартылысы электрондардың еркін жүгірісінің бірнеше ұзындығын құраса, онда доғалық разрядта оның ені шамамен электрондардың еркін жүгірісінің орташа ұзындығына тең болады. Доғалық разрядтағы потенциалдың катодқа құлау мөлшері солғын разрядқа қарағанда әлдеқайда аз. Ол шамамен аспап толы газ ионизациясының потенциалына тең. Бұл мәндегі  разрядтың жану мүмкіндігі келесі шарттарға негізделген.

*Біріншіден,* потенциалдың катодты құлау қабатындағы тартылысты азайту нәтижесінде катодтан шығатын электрондар оны газ атомдарымен еш соқтығыссыз өтеді және осыған байланысты газ ионизациясына жетерлік энергия  жинақтайды. Иондардың катодқа қарай қозғалысы да атомдармен дерліктей соқтығыспай, энергия жоғалтусыз жүреді, яғни әрбір ион катодқа қарай потенциалдың катодқа құлау қабатынан өту барысында алынған энергияның барлығын әкеледі.

*Екіншіден,* катодтағы дақта жоғарғы температураны ұстап тұру үшін катодқа ұшып келетін әрбір жекелеген ионның энергиясы маңызды емес, катодты даққа келетін жиынтық ион энергиялары маңызды. Бұл жағдайда энергия тығыздығы үлкен болып шығады, себебі доғалық разрядқа ауысу барысында ток артады және әсіресе катодты дақтың тығыздығы артады.Сонымен қатар, потенциалдың катодқа құлауы аспапты (камераны) толтырушы газ ионизациясының  потенциалынан дерліктей аз болуы мүмкін емес, өйткені потенциалдың катодқа құлауы барысындағы тарқатылған электрондар потенциалдарының катодқа құлау қабатындағы сыртқы шекарасындағы газды белсенді түрде иондауы қажет.

**3.2 Доғалық разрядтың катод аумағындағы процестердің анализі. Пуассон теңдеуі**

Разряд, аналогиялық түрдегі өздік доғалық разрядты ішкі энергия көзі қыздырылған катодты приборда қолдану арқылы алуға болады.Осындай разрядтың вольт – амперлік сипаттамасы 3.2.1-суретте көрсетілген.















**Сурет 3.2.1** - Өздік емес доғалық разрядтың вольт – амперлік сипаттамасы

Электродтар арасындағы кернеу әсерінен аз потенциалдағы газ ионизациясы прибор арқылы вакуумдық диодта (Оа аймағы) электрондық ток өтеді. Ток пен кернеу арасындағы байланыс 3/2 дәрежеге жақын теңдеу арқылы табылады.Жақын потенциалды газдың ионизацияланған электродтар арасындағы кернеуден, электродтар арасындағы кеңістікте плазма пайда болады және өздік доғалық разрядтағы секілді катодқа жақын аумақта өтеді.Катод пен анод арасындағы кернеудің аздаған төмендеуі разрядтың (аймағы) пайда болуының вольт – амперлік сипаттамасына алып келеді. аймағының сипаттамасы  анодтық ток катодтағы эмиссия тоғынан аз болғандағы режимге сәйкес келеді. Катод маңындағы артылған көлемді электрондық заряд әлсіз тежелген электр өрісін тудырады.

 (3.2.1)

осы формуладан  қолданып катодтағы электронды және ионды ток тығыздықтарының қатынасын аламыз:

 (3.2.2)

Өздік емес доғалық разрядта токтың негізгі бөлігі электронға өтетінін көрсетеді.анодтық токқа катодтық токтағы эмиссия нүктесінің сипаттамасы сәйкес келеді. Анодтық токтың ары қарай өсуі потенциалдың катодқа құлауының артуына, ізінше, разрядтағы кернеудің барлық соқтығысына алып келеді (аймағы). Ионизацияның күшейуі және катодтың жоғарғы жағындағы үдеткіш өрістің пайда болуымен артады. Ток эмиссиясының артуы нәтижесінде Шоттки эффектісі жоғарғы анодтық токпен жұмыс жасауға мүмкіндікті қамтамасыз етеді. аймағында негізінде шынайы приборда жұмыс жасауға болмайды, себебі  артуы және катод маңындағы үдеткіш өрістің пайда болуы плазмадан өтетін оң иондардардың қарқынды бомбалауының нәтижесінде катодтың тез бұзылуына алып келеді. Үдеткіш өріс пайда болғанда ионды бомбалауды арттырса электронды және ионды ток тығыздықтарының қатынасы ион компоненттерінің артуына алып келеді.

**3.3 Разряд бағаны. Орта қысымдағы плазманың теориясы. Шоғырлардың таралуы**

Егер өздік доғалық разрядтың катодты аймағындағы процесстер, әсіресе, оңай қалқитын катодтарда, салыстырмалы түрде аспаптағы (камерада) газ қысымына баяу тәуелді болады, онда разряд бағанасында және разряд бағанасының сыртқы түріндегі процесстерде айтарлықтай газ қысымының өзгерісі орын алады.

Сыртқы түріне қарай цилиндрлі трубкадағы барлық газдарды төменгі және жоғарғы қысымдағы бақыланатын біртекті разряд бағанын ажыратады, қос сынапта және атмосфераның ретті қысымында, және қабатты бағана разряды ұзындығы бойынша чечевица тәрізді ашық қабаттардың кезектесуін сипаттайтын страт және газдың қараңғы аймақтары.









**Сурет 3.3.1** -Разрядты жолақтағы электрондар және иондардың концентрациясының орташа қысымының радиалды таралуы

























**Сурет 3.3.2** - Орташа қысымды разряд бағанасындағы электрон және иондар концентрациясының радиалды таралуы

Страттар қозғалыссыз немесе түтік бойында жылжығыш(жүгіргіш страттар) болуы мүмкін. Кей жағдайларда страттардың жылжығыштығы соншалықты тез, сыртқы баған разряды біртекті көрінеді. Төменгі және жоғарғы диапазондардан ерекшеленетін және кейбір жорамал жасауға мүмкіндік беретін, орташа диапазонды қысымға тән екі ерекшелігі бар:

1) орташа қысымда атомдар мен электрондардың еркін жүгірісінің ұзындығы электродтар мен разрядты түтік радиустарының арасындағы ара қашықтықтан төменгі қысым диапазонымен салыстырғанда әлдеқайда аз және кереғар. Бұл орташа қысымда бейберекет қозғалыс бағытталғаннан басым түседі деп есептеуге мүмкіндік береді;





















**Сурет 3.3.3** - Те электронды газ температурасының р0 қысымды және радиусы R разрядты түтікшедегі орта қысымды плазмаға тәуелділігі

2) орташа қысымда газ атомдарының иондалуы және оның иондалу деңгейі жоғарғы қысым диапазонымен салыстырғанда көлемде кездесу мүмкіндігін санауға және электрондар мен атомдардың рекомбинациясы (қайта әрекет етуі) болатындай тым үлкен емес. Басқаша айтқанда, орташа қысымда көлемдегі рекомбинацияны елемеуге және ол тек разрядты түтік қабырғасында жүріп жатыр деп есептеуге болады.













       







**Сурет 3.3.4** -  иондалу, () резонансты және () резонансты емес табылған электрондардың қозуы мен  қарқынды соқтығысуының энергия бөлігі

Қабырғадағы электрондар мен иондардың рекомбинациясы иондар мен электрондардың концентрациясының түтік осінен қабырғаға құлауына алып келеді, ал бұл концентрация градиенті өз кезегінде зарядталған бөліктерінің қабырғаға диффузиялық қозғалысын келтіреді.

 радиусты ұзындығы 1м разрядты түтік қимасындағы процесстерді қарастырайық (3.3.1- сурет).  радиусының бетін ерекшелеп алайық. 1 м2 беттен 1 с өтетін электрондар ағыны мынаған тең . Қос полярлы диффузия теңдігіне сәйкес, барлық беткейден өтетін электрон ағыны

























Hе

Nе

Kr

Ar

**Сурет 3.3.5** - Плазмадағы ұзартылған потенциал градиентінің газ қысымына тәуелділігі

 радиусты ұзындығы 1м разрядты түтік қимасындағы процесстерді қарастырайық (3.3.1- сурет).  радиусының бетін ерекшелеп алайық. 1 м2 беттен 1 с өтетін электрондар ағыны мынаған тең . Қос полярлы диффузия теңдігіне сәйкес, барлық беткейден өтетін электрон ағыны

 (3.3.1)

Енді  радиус беткейінен өтетін электрондар ағыны үшін теңдікті жазайық:

 (3.3.1)

Бұл екі ағын ажыратылған, өйткені екі беткеймен шектелген газ көлемі ішінде электрондар мен иондардың генерациясы жүреді. 1 секундта бір электронмен жүзеге асатын иондалу санын  деп белгілейік. Онда 1 секундта жүзеге асатын сол көлемдегі бүкіл электрондардың иондалу саны, бұл зарядтардың балансын жазуға мүмкіндік береді:

 (3.3.2)

Квадрат жақшадағы формула  шамасының  координаталары нүктесінен координаталы нүктесіне артуын көрсетеді. Осыдан, (3.3.2) теңдігін былай жазуға болады

 (3.3.3)

Жақшадағы теңдеуді (3.3.3) диффериенциалдап алатынымыз

 (3.3.4)

Бұл теңдеудің шешімі Бессел функциясының  аргументті нөлдік реті болып табылады:

 (3.3.5)

Орташа қысымдағы плазма теориясының қорытындысы эксперименттік зерттеу нәтижесімен сәйкес келеді.

**3.4 Плазма параметрлерін зонд әдісімен анықтау**

Зонд дегеніміз плазманы зерттеуде қолданатын көмекші металды электрод.Ол жінішке сым, шарик немесе пластинка түрінде болуы мүмкін.

Плазмадан бұлтқа ретсіз қозғалыс нәтижесінде өтетін электрондар қайтадан плазмаға тебіледі, ал бұлтқа ретсіз қозғалыс үрдісінде өтетін және оған енетін оң иондарүдеткіш өріске түседі де ионды зондтық ток жасап зондқа айналады. Бұл берілген аймақта ионды ток теңдеуінің сипаттамасын жазуға мүмкіндік береді:

 (3.4.1)

- плазмадағы ретсіз ток тығыздығы; - зонд маңындағы ионды бұлттың шегі.

Зонд потенциалының көп азаюынан ток электронды болып және тез өседі. Зонд потенциалы нүктеде плазма потенциалына сәйкес келеді. Бұл уақытқа дейін ионды қабат жойылады, ал зонд электрон және иондар үшін мөлдір болып қалады. Электрондар мен иондар зондқа тартылысты, тебілуді сезінбей ретсіз қозғалыс кезінде барады. с нүктесіндегі (3.4.1-сурет) потенциалға сәйкес зонд потенциалы кезінде зондтағы ионды ток

 (3.4.2)

Зондтағы электронды ток

 (3.4.3)







- +

- +



**Cурет 3.4.1** - Зондтық әдіспен плазма параметрлерін өлшейтін арнайы схема

Зондқа плазма потенциалына қарағанда (аймағы) оң потенциал бергенде зонд маңында электронды қабық пайда болады. Оң иондар қабыққа кіргенде зондтық өрістің әсерін сезеді де плазмаға қайта ығысады, ал электрондар үдеткіш өріске түскенде зондқа кіреді. Зондтағы  электронды ток қабықпен бірдей болғандықтан оның жоғарғы жағы өзгермейді, тек аса жоғары көбейген оң потенциалды зондтағы электронды ток өзгермейді.























**Cурет 3.4.2** - Үлкен жазық зондтың зондтық сипаттамасының түрі

Зондтық сипаттамадағы аймақтан шығатын электронды ток өзгеру заңын қарастырайық. Электрондар жылдамдық бойынша максвелдік таралуға ие болады деп алайық. Онда -тен -ға дейінгі  осінде бағытталған 1 с-та 1м2 зондтық қабыққа түсетін электрондар санының жылдамдығы

 (3.4.4)

Зондқа  жылдамдық компонентасы  қатынасты қанағаттандыратын электрондар ғана жете алады. Зондқа жеткен толық электрондар санын  -дан -ға дейінгі шекте интегралдау арқылы анықтауға болады:

 (3.4.5)

Теңдеуді электрон зарядына көбейтіп плазмаға қатысты  потенциалды зондтағы электронды ток тығыздығын аламыз

 (3.4.6)

Логарифмдеп болған сон

 (3.4.7)



















**Cурет 3.4.3** - Жартылогарифмді зондтың сипаттамасы:

1-цилиндрлік зондта; 2-жазық зондта

Теңдеу зондтағы электронды ток тығыздығы логарифіне тәуелділігі сызықты болу керектігін көрсетеді(3.11-сурет). α бұрыштың абсцисса осімен тура құлауы мына қатынасты қанағаттандырады

 (3.4.8)

Мұндағы электронды газ температурасы

 (3.4.9)













**Cурет 3.4.4** -Аз шамадағы цилиндрлік және дөңгелек зондтың зондтық сипаттамасының түрі

Соңғы кезде аса жоғары радиотолқынды зондтауға негізделген плазма параметрлерін зерттейтін әдіс кең таралған. Бұл әдіс АЖЖ аймағында арнайы білімді талап етеді.

**3.5 Тәждік разряд**

Тəж - тоғы аз, əлсіз жарық шығаратын разряд. Өріс дереу күшейіп кететін үшкір заттардың айналасында пайда болады. Тек осы аймақта газ иондалып жарқырайды. Тəж көбіне атмосфералық қысымда, жоғары кернеулі сымдарда, найзағай өткізгіштерде жəне кеме діңгектерінде пайда болады.Разрядтың бұл түрін жағып ұстап тұру, электрондар тудыратын аймақтағы шарттар мен процестерге тəуелді болады. Өріс тудыратын электродтар бір-бірінен алшақ орналасады жəне геометриялық пішіндері əр-түрлі болуы мүмкін. Айналасында жарық пайда болатын электрод, тəждеуіш деп аталады. Жарықтың пайда болуы электрод пен гак шекарасында болатын элементар процестерге байланысты.

Тəж разрядтың пайда болып даму шарты тəждеуіш электродтың таңбасына байланысты болады. Егер электрод катод болса, тəж «теріс» деп аталады, ал жану процесі солғын разрядтікіндей болады жəне электрод айналасындағы жарық біркелкі таралады. Егер электрод анод болса, тəж «оң» деп аталады, бұл кезде электрод айналасындағы жарық тарамдалған жіп тəріздес жан-жаққа шашырайды. Жану процесі, стримердікіндей болады.Разрядты ұстап тұру аймағындағы электрондарды тудыру механизмі жəне жағу шарттары тəждеуіш электродтың таңбасына байланысты болады.

Егер тəж теріс болса, көшкіндік көбею болады. Тəж разрядтың жануы кезінде, разряд тоғының шамасына байланысты оған қосарлана акустикалық құбылыстар (пышылдау, ысылдау, сытырлау) шығатынын айта кеткен жөн.

Тəж тоғы периодты жəне дұрыс кезектескен импульстардан құралған, əрбір импульстағы ток амплитудасы өзгермейді. Кернеуді жоғарылатқан кезде импульс тоғының өсуі жиіліктің, ізінше импульстің өсуімен байланысты. Ол өз кезегінде жинақталу уақыты мен кеңістіктік зарядтың жұтылуына тəуелді болады. Тәж кіші радиусты оң және теріс полярлы электрод секілді бола алады.











**Сурет 3.5.1** - Коаксиалды электродтардың арасында тәждік разрядтардың пайда болуы

Электрод кіші  радиуста - анод, ал цилиндрдің ішкі радиусы – катод болатын (3.5.1-сурет) жағдайды қарастырып көрейік. 2.2.2 теңдеуде катод – анод аралығында өтетін ионизация саны катодтан шығатын бір электронға тең . 2.2 көрсетілгендей экспонентаның көрсеткішін  қатынасы арқылы алуға болады:

 3.5.1

Егер анод пен жоғарғы *r* радиус аралығында болатын ионизация санын анықтайтын болсақ, интегралдың *r2* шегін *r* (шек*E2/p0* - ді *Er/p0*) ауыстыру керек.Осылайша, (42) теңдеуі газ қысымына нақты шарт қоюға сонымен қатар белгілі электрон геометриясын осы газ қабатында өтетін ионизация бөлігін табуға мүмкіндік береді:

 (3.5.2)

3.5.2- суретте аргон разрядының *r1=*0,09 см, *r2*=2,3см болғандағы нәтижесі және  электродпен ара қашықтығы 1/5-ке тең тығыз газ қабаты көрсетілген.























**Сурет-3.5.2.** Ионизацияның бөлігінің газ қысымына тәуелділігі

Суретте газ қысымы Па (100 мм рт.ст.) барлық ионизация актысының 99%-і ішкі электрод маңындағы газдың нәзік қабатында өтеді.Цилиндрлік электродтағы өздік разрядтың шарты былай жазылатын

 (3.5.3)

Бұл теңдеу егер қызған разрядтағы кернеулік өрісін қойсақ стационарлы разрядтың да шарты болады. Теңдеудің нәтижесі тәждік разрядтың вольт – амперлік сипаттамасын елестете алады. Ол үшін Пуассон теңдеуін қолданамыз

 (3.5.4)

. Ионды ток катодтың бірлік ұзындығына

 (3.5.5)

Токтың ионды компонентасы өзгермейді

 (3.5.6)

(3.5.6) мағынасын (3.5.4) қойсақ, онда

 (3.5.7)

Интегралдаған соң

 (3.5.8)

(3.5.8)-ке  және - қойсақ, онда

 (3.5.9)

(3.5.8)-те интегралдаған тұрақтыға мәнін қойсақ



Ыңғайлы болу үшін айнымалы енгіземіз:

, 

(165) теңдеуі мына түрге өзгереді



Айнымалыны бөліп және шектері -тен -ға дейін және -ден -ге дейін интегралдасақ, онда



осыған мән берейік. Аздаған тәж тоғында жақшаның екінші мүшесі аз және . Сонымен бірге цилиндрлік конденсаторда  потенциалдың таралу заңымен сәйкес келеді. Осының бәрі (167) теңдеуді мына түрде жазуға мүмкіндік береді



 деп белгілейік. Аз ток режимін қарастырғандықтан В2 бірге жуық деп аламыз. Сонда

 (3.5.10)

Сонымен қатар (3.5.8) теңдеуін оңайлатуға болады, егер :



Бұл теңдіктің оң жағы  ұзындығы  токқа пропорционал болғандықтан жуық , аз токтағы тәждік разрядтың вольт – амперлік сипаттамасы пайда болады:

 (3.5.11)

Теңдіктен оң тәждің вольт – амперлік сипаттамасы артатыны шығады.

**3.6 Ұшқын разряд**

Ұшқын разряд атмосфералық қысымға жақын немесе одан асатын газдарда пайда болады. Мұндай шарттарда кернеудің пайда болуы тәуелсіз разрядттарда жоғары болады. Бірақта разрядттардың арасындағы ұшқын ағыннан кейін оның кедергісі бірден азайып, тізбектегі кернеудің құлауынан кейін күшті ток пайда болады. Разрядниктердің арасында елеусіздей кернеу пайда болады. Оның негізгі бөлігі тізбектің кернеуіне және кернеу көзінің ішкі кедергісіне құлайды.

Кернеу көзінің көп емес қуатында (ішкі кедергі көп болғанда) қысқа уақытта импульсті ток өткеннен кейінразряд тоқтайды, электродтардағы кернеу қайта өседі және ұшқынды пробойлар қайталанады. Кернеудің өсу уақыты және ұшқын разрядттың интенсивтілігі жоғары болған сайын электродтардың арасындағы ұшқынды аралықтардың сиымдылығы үлкен болады. Бұл меншікті сиымдылық немесе конденсатордың қосымша сиымдылығы болуы мүмкін. Соңғы жағдайдағы разряд конденсирленген разряд деп аталады.

Кернеу көзінің жоғары қуатында (тізбектегі кедергі аз) катод қатты қызып, оның беткі аудандарында термоэлектронды эмиссия процесі жүріп разряд доғалы разрядқа айналады.

Ұшқын разрядттың сыртқы түрі разряд арасындағы жарық ирелең ұшқынды белдемшеге (полоса) ұқсайды. Кейбір жағдайларда бұл жарқыраған белдемшелер разряд аралығында үзіліп кетіп, екінші электродқа жетпей қалады. Осылайша разрядттар арасындағы ұшқынды разрядттың солғын және доғалы разряд бағанынан айырмашылығы біртекті болып табылады.

Пирометрлік өлшеулердің есебі бойынша газ температурасы ұшқынды разряд арналарында 10 000oC сәйкес келеді. Аз уақыттың ішінде мұндай газ температурасының кенеттенкөтерілуі, ұшқын разрядттарда өте күшті газ қысымының ұлғаюына алып келеді. Мұндай құбылыстар ұшқын разрядттардың дыбысты эффектілерінің түрін сипаттайды мысалы, шыртылдау, конденсирленген разрядттарда қаты шерткенде найзағай сияқты қатты гүрілдеу және т.б мұндай дыбыс эфектілері ұшқын разрядттың қуатының күшті екенін көрсетеді.

Мұндай бақылаулар ұшқынды разрядтың бастапқы даму сатысында электронды-ионды көшкіннің пайда болуын, сондай-ақ иондалған бөлшектердің тығыз топтасуын, жылдамдық бойынша таралуын, қарапайым көшкіннің қозғалысының жылдамдығының ұлғаюын табуға мүмкіндік береді. Мұндай құрылымдар стримерлер деп аталады. Ұшқын разрядтта стримерлер анодттың айналасында пайда болып, катодқа қарай жылжиды (оң стримерлер) немесе анодқа қарай жылжиды (теріс стримерлер).











Катод

Анод





**Сурет-3.6.1**. Теріс стримердің пайда болу схемасы

Стримерлі теориясы ұшқынды разрядттың бір көшкінді ойық теориясы болып табылады. Таунсендтік электронды көшкін теориясынан айрмашылығы, төменгі қысым облыстарында жасақталған және разрядттың дамуын көшкіннің көп есе өсуі ретінде қарастырады. Осы теорияға сәйкес стримерлер пайда болу үшін, разрядттық аралық арқылы тек қана бір көшкін ғана өтеді. Қарапайым теріс стримерлердің пайда болу құбылысын 3.6.1 суреттен түсіндіруге болады.

Қандай да бір сыртқы фактордың әсерінен катодттың айналасында электрон пайда болады. Күшті электрлік өрістің қозғалысынан анодттың кернеу пайда болып, ол электронды-ионды көшкін *I* туғызады. Көшкіндегі газдың қарқынды иондануынан осы аралықтағы газдың өткізгіштігінің жақсаруына және кернеудің түсуінің азаюына алып келеді. Кернеудің өсуі, электр өрісінің кернеулігінің көшкін алдындағы кеңістікке («басы» және анодттың аралығы) сәйкес келеді. Көшкіннің дамуы, жоғарғы қысым шарттарында газды жоғары температураға дейін қыздыруынан және оның жарқырауынан жүзеге асады. Жарқылдау көлемдегі электрондар мен иондардың рекомбинациясын тудырады. Фотондар көшкіннің барлық бағыттары бойынша таралып (оның ішінде алдыға қарай) газдардағы атомдардың фотоиондалуын және *II, III, IV* жаңа көшкіннің пайда болуын туғызады.Осыдан жаңа (екінші) көшкін пайда болып, кернеулік өрісі үлкен болатын аумақтарында негізгі «бас» көшкіннің алдында пайда болу ықтималдығы біршама көп болады. Екінші ретті көшкіннің сәуленуінен, стримердің анодқа қарай жылдам қозғалысынан үшінші ретті көшкіннің пайда болуына алып келеді.

Оң стримерлер басқаша дамиды. Олардың пайда болуы уақыты «бас» негізгі көшкін анодқа жеткенде, тізбектен электрон ұшып шығып анодттың алдында оң ионды көлемді артық заряд пайда болады. Бұл жағдайда көшкіндегі өріс кернеулігі және катод кеңістігіндегі көлемді оң заряд иондары ұлғайады. Екінші ретті көшкіндер көлемді фотоионизация нәтижесінде өрістің әсерінен бірінші көшкін арнасына ұмтылғанда, көлемді оң зарядттың өсуі олардың катодқа қарай жылжуынан пайда болады. Осыдан оң стримерлер арнасы құрылады. Оң стример катодқа жеткенде, оның арнасында пайда болған электрондар γ-процесінің нәтижесінде катодттан ұшып шығарылады. Стример арнасында көлемді оң зарядттың бейтараптануынан плазма секілді пайда болып, анодттан катодқа қарай жақындайды. Осындай қысқа аудандарда кернеу өрісінің ұлғаюынан жаңа көшкіндер жаңарып оң стримерлер пайда болады. Стримерлердің сатылы таралуы анод пен катод плазма жібімен үздіксіз байланысқанға дейін жалғаса береді. Осы жағдайда аралық кедергі кенеттен азайып, сол арқылы ток кенеттен ұлғайып ары қарай доғалы разрядқа ауысады (үлкен қуат көздерінде) немесе ток тоқтайды және ұшқын разряд процессі қайталанады.

Сурақтар

1. Электр зондтың Вольамперлік сипаттамасын келтіріңіз.
2. Газдағы Ұшқын разрядті қалай түсінесіз.
3. Орта қысымды плазманың теориясын доғалы разрядқа пайдалануға бола ма?
4. Зондтың ВАСынан электрондардың температурасын табуға бола ма?
5. Тәж тәрізді газ разряды сипаттаңыз.
6. Өздік доғалы разрядтағы потенциалдың ұзындығы бойынша таралымын келтіріп түсіндіріңіз
7. Плазмадағы электр зондының схемасы қалай жұмыс істейді?

**ҚОЛДАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР**

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Издательство Интеллект, 2009, 430 с.
2. И.М. Бортник, А.А. Белогловский, И.П. Верещагин и др. Электрофизические основы техники высоких напряжений: учебник для вузов. Москва, Издательский дом МЭИ, 2010, 568 с
3. Г.Н. Рохлин. Разрядные источники света. М.Энергоатомиздат, 1991. 720 с.
4. Двинин С.А. Физические основы газового разряда. Учебное пособие. Изд-во МГУ име ни М.В. Ломоносова., 2012, 119 с.
5. Морозов А.И. Плазмодинамика. М. Физматлит, 2007, 567 с.
6. Балаезян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд. Издательство МФТИ, 1997, 160 с.
7. Колесников П.М. Электродинамическое ускорение плазмы. М., 1971, 386 с.
8. Райзер Ю.П. Основы физики газоразрядных процессов. М.Наука, 1980. 416 с
9. Козлов О.В. Электрический зонд в плазме. М. Атомиздат, 1971, 291 с.
10. Б.М.Смирнов. Физика слабоионизованного газа. М.Наука,1972. 416 с
11. Е.П.Велихов, А.С.Ковалев, А.Т.Рахимов. Физические явления в газоразрядной плазме. М.Наука, 1987.160 с.
12. Демкович. В.Д Сборник задач по физике. М.Просвещение, 1984.
13. Б.Н.Швилкин. Газовая электроника и физика плазмы в задачах. М.Наука 1978, 160 с
14. Г.Н. Рохлин. Разрядные источники света. М. Энергоатомиздат, 1991. 720 с.
15. Б.М.Смирнов. Физика слабоионизованного газа. М.Наука, 1972. 416 с
16. Е.П.Велихов, А.С.Ковалев, А.Т.Рахимов. Физические явления в газоразрядной плазме. М. Наука, 1987.160 с.
17. Гутуров М.М. Основы светотехники и источники света. М.:1995
18. Мешков В.В. Основы светотехники. М.: «Энергия», 1979, 360с.
19. Козлов М.Г., Томский К.А. Светотехнические измерения. – СПб.: 2004, 320 с.
20. Ишанин Г.Г., Козлов М.Г., Томский К.А. Основы светотехники. ВШ, 1987, 340 с.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Кіріспе** | | 3 |
| **1** | **ГАЗДАҒЫ ЭЛЕКТР ТОҒЫ** | 5 |
| 1.1 | Газдардағы бөлшектердің орташа еркін жүру жолының ұзындығы | 5 |
| 1.2 | Газдардағы заряд тасымалдаушылар | 6 |
| 1.3 | Газдағы электр разрядының ВАС-ы | 9 |
| **2** | **СОЛҒЫН РАЗРЯДТЫҢ ТЕОРИЯСЫ** | 11 |
| 2.1 | Ионизация коэффициенттері. Газдық күшейту теңдеуі | 11 |
| 2.2 | Біртекті емес өрістегі газдық күшейту | 15 |
| 2.3 | Көлемдік иондау коэффициентінің электр өрісі кернеулігі мен газ қысымына тәуелділігі. | 17 |
| 2.4 | Өздік разряд пайда болу үшін кернеудің қысымға тәуелділігі | 19 |
| 2.5 | Электрод аралық кеңістіктегі разрядтардың жиналуы, разрядтың дамуы | 23 |
| 2.6 | Солғын разрядтың негізгі қасиеттері мен сипатаммалары | 28 |
| 2.7 | Солғын разрядтың васын алу | 30 |
| **3** | **ДОҒАЛЫҚ РАЗРЯДТАР** | **35** |
| 3.1 | Өздік доғалық разряд. Доғалық разрядтардың түрлері | 35 |
| 3.2 | Доғалық разрядтың катод аумағындағы процестердің анализі. Пуассон теңдеуі | 36 |
| 3.3 | Разряд бағаны. Орта қысымдағы плазманың теориясы. Шоғырлардың таралуы | 37 |
| 3.4 | Плазма параметрлерін зонд әдісімен анықтау | 41 |
| 3.5 | Тәждік разряд | 44 |
| 3.6 | Ұшқын разряд | 48 |
|  | Әдебиеттер | 56 |
|  |  |  |
|  |  |  |