

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ БІЛІМ ЖӘНЕ  
ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

АКАДЕМИК Е.А.БӨКЕТОВ АТЫНДАҒЫ ҚАРАҒАНДЫ  
УНИВЕРСИТЕТІ

**Ж.Т. Камбарова**

**ЭЛЕКТРСТАТИКАЛЫҚ ӨРІСТЕР НЕГІЗІНДЕГІ  
ЖОҒАРЫ ТИІМДІ КОРПУСКУЛАЛЫ-ОПТИКАЛЫҚ  
ЖҮЙЕЛЕРДІ ҚҰРАСТЫРУ ЖӘНЕ ЕСЕПТЕУ**

*Монография*

*Жұмыс «ЖОО үздік оқытушысы – 2019»  
гранты аясында орындалды және  
қаржыландырылды*

Қарағанды  
2020

ӘОЖ 537.533.34

КБЖ

К

*Баспаға академик Е.А.Бөкетов атындағы Қарағанды  
университетінің Ғылыми кеңесі ұсынған*

### *Сараптамашылар*

**А.К. Арынгазин**, ф.-м.ғ.д., проф., Л.Н.Гумилев атындағы  
Еуразия ұлттық университеті;

**Қ.Т. Ермағанбетов**, ф.-м.ғ.к., проф., академик Е.А.Бөкетов  
атындағы Қарағанды университеті;

**А.С. Балтабеков**, ф.-м.ғ.к., PhD докторы, доцент, академик  
Е.А.Бөкетов атындағы Қарағанды университеті.

### **К Камбарова Ж.Т.**

Электрстатикалық өрістер негізіндегі жоғары тиімді  
корпускулалы-оптикалық жүйелерді құрастыру және есептеу:  
монография. / Ж.Т. Камбарова. — Қарағанды: Арко баспасы,  
2020. — 129 б.

ISBN

Монография зарядталған бөлшектер ағындарының энергияларын талдауға  
арналған жоғары тиімді корпускулалы-оптикалық жүйелерді есептеу және  
модельдеуге арналған. Электрстатикалық өрістер негізіндегі айналы энергия  
талдағыштарының электронды-оптикалық сұлбалары есептелген.

Кітап корпускулалық оптика, электронды спектроскопия, аналитикалық  
аспап жасау салаларында маманданған ғылыми және инженерлік-техникалық  
қызметкерлерге арналған, сонымен бірге физика-техникалық және  
жаратылыстану-ғылыми мамандықтардың студенттері, магистранттары және  
докторанттарына ұсынылады.

ӘОЖ 537.533.34

КБЖ

ISBN

© Камбарова Ж.Т., 2020

## Мазмұны

<b>Қысқартулар мен шартты белгілер .....</b>	<b>5</b>
<b>Кіріспе.....</b>	<b>6</b>
<b>Тарау 1. Корпускулалы-оптикалық жүйелерді есептеудің заманауи мәселелері.....</b>	<b>10</b>
1.1 Зарядталған бөлшектер ағындарының энергия талдағыштарына шолу.....	10
1.2 Корпускулалы-оптикалық жүйелерді есептеу әдістері.....	33
<b>Тарау 2. Біртекті емес электрстатикалық өріс негізінде зарядталған бөлшектердің энергия талдағышын модельдеу.....</b>	<b>44</b>
2.1 Электрстатикалық біртекті емес өрістің электронды-оптикалық қасиеттерін есептеу және талдау.....	45
2.2 Біртекті емес электрстатикалық өріс негізінде айналы энергия талдағыштың сұлбасын модельдеу.....	52
<b>Тарау 3. Гексапольді-цилиндрлік өріс негізіндегі электрстатикалық энергия талдағыштарының корпускулалы-оптикалық қасиеттері.....</b>	<b>59</b>
3.1 Электрстатикалық өрістерді синтездеу үшін мультипольдік әдісті қолдану.....	59
3.2 $\mu = 1, \gamma = 1$ кезінде гексапольді-цилиндрлік энергия талдағышының электронды-оптикалық сұлбасын есептеу және модельдеу.....	62
3.3 Жұмыс көлемін шеткі өрістердің әсерінен қорғауды ұйымдастыруымен гексапольді-цилиндрлік өріс негізінде ұзынтоғысты энергия талдағышын сандық модельдеу.....	77
3.4 $\mu = 2, \gamma = 1$ кезінде электрстатикалық гексапольді-цилиндрлік айналы энергия талдағышын сандық модельдеу.....	85

<b>4 Электрстатикалық декапольді-цилиндрлік өріс негізіндегі осьтік симметриялық энергия талдағышы ...</b>	<b>91</b>
4.1 Декапольді-цилиндрлік энергия талдағышының сұлбасының параметрлерін есептеу.....	94
4.2 Декапольді-цилиндрлік энергия талдағышының электронды-оптикалық сұлбасын сандық модельдеу.....	104
<b>Қорытынды.....</b>	<b>111</b>
<b>Қолданылған әдебиеттер тізімі.....</b>	<b>113</b>

## Қысқартулар мен шартты белгілер

Ұсынылған жұмыста келесі қысқартулар мен шартты белгілер қолданылады:

ЕИМС – екінші ретті ионды масс-спектрометрия

ГЦӨ – гексапольді-цилиндрлік өріс

ҚҚЦАТ – қос каскадты цилиндрлік айналы талдағыш

ДЦӨ – декапольді-цилиндрлік өріс

ЭСӘ – электрондық спектроскопия әдістері

ПЦАТ – параллельді цилиндрлік айналы талдағыш

РФЭС – рентгендік фотоэлектрондық спектроскопия

СА – сфералық айна

ҮЦАТ – үш электродты цилиндрлік айналы талдағыш

ЦА – цилиндрлік айна

ЦАТ – цилиндрлік айналы талдағыш

ЭОС – электрондық оже-спектроскопия

## Кіріспе

Жетекші заманауи технологиялар оның ішінде нанотехнологиялар бетте жүретін құбылыстармен анықталады. Беттері маңызды рөлді атқаратын әр түрлі наноматериалдардың, наноөлшемді құрылымдардың қасиеттерін зерттеуге қызығушылық артуда. Қазіргі кезде қатты дене бетін зерттеу – наноөлшемді және молекулалық құрылымдардың физикасы, заманауи материалтану, нано- және микроэлектроника, нанотехнология, конденсирленген күй физикасы және жұқа қабыршақтар физика мен химиясы үшін үлкен мәнге ие болатын дамушы білімдер облысына айналды.

Нанообъектілердің және наножүйелердің құрылымын және құрамын диагностикалаудың көптеген түрлері екінші ретті электрондардың энергиялық спектрлерін нақты талдауға негізделген. Қажетті диагностиканың келешек негізі - электрондық спектроскопия әдістері болып табылады. Бұл әдістер қатты дененің тереңдігі бойынша нанометрлік ажыратуымен сипатталады. Энергия талдау мақсаттары үшін жиі әр түрлі пішінді өрістер негізінде құрастырылған энергия талдағыштары қолданылады.

Электрондық спектроскопияның іске асырылуы - басты элементі төмен және орташа энергиялы электрондардың дисперсиялық энергия талдағышы болып табылатын күрделі құралдардың қолданысына негізделген. Заманауи технологиялардың әрі қарайғы дамуы диагностика құралдардың күйімен анықталады. Сондықтан зарядталған бөлшектер ағындарының энергия талдауы - бар құралдардың жетілдіруін немесе жаңа корпускулалы-оптикалық жүйелердің өндеп шығарылуын талап етеді.

Зарядталған бөлшектер ағындарының энергия талдаудың дисперсиялық жүйелерін құрастырудағы ең маңызды мәселелерінің бірі – ауытқушы өрісті анықтау және ауытқушы электродтардың пішінін есептеу болып табылады. Ал аспаптың электродтар пішінін іздеу және таңдау оны дайындау қарапайымдылығымен және жоғары сапалы энергия талдау мүмкіндігімен байланысты болуы қажет.

Айналық типті электрстатикалық энергия талдағыштар екі типке жіктеледі: жазық симметриялы және осьтік симметриялы. Жазық симметриялы энергия талдағыштарға жазық айна, жәшіктік, екіжақтылы бұрыш, қималы цилиндр, лемнискаттық айна, аксиалды емес цилиндрлер, гиперболалық және эллипсоидтық айналар, клинтәріздес талдағыштар жатады. Ал осьтік симметриялы энергия талдағышқа цилиндрлік, сфералық, конустық типті және т.б. энергия талдағыштары жатады.

Қатты дене бетінің физикасының зерттеу пәні - элементтік құрамды және қатты дене бетіндегі атомдардың орналасуын зерттеу, сонымен қатар олардың механикалық, химиялық және басқа қасиеттерін теориялық және эксперименттік зерттеу болып табылады. Көлемді қатты денелер жағдайы үшін де зерттеудің түпкі мақсаты - заттың қасиеттері, құрамы және құрылымы арасындағы байланысты орнату болып табылады. Сондықтан кейбір қалыңдықтағы беттің немесе беткі қабаттың элементтік құрамын нақты анықтау беттік физика саласындағы эксперименттерді дұрыс түсіндірудің шарты болып табылады [1].

Бетті зерттеу әдістерінің саны өте көп және үнемі өсуде. Қазіргі уақытта жетпістен астам «беттік» әдістер бар, олардың көпшілігінде өзінің функционалдылығымен ерекшеленетін бірнеше модификациялары бар. Бұл әдістер зарядталған бөлшектердің ағындарының қатты дене бетімен өзара әрекеттесуіне негізделген, сондықтан мұндай зерттеулер жоғары вакуумды құруды қажет етеді. Бетті талдау әдістері заттың бетінен шығарылатын бөлшектердің табиғаты, олардың кеңістіктік және энергиялық таралуы және олардың саны туралы ақпарат алуға мүмкіндік береді. Бұл ақпарат өлшеулер кезіндегі бетте қандай құбылыстардың өтіп жатқанын анықтауға мүмкіндік береді.

Бетті талдаудың көптеген әдістері үшін қасиеттер қатарының ортақтығымен сипатталады. Атап айтқанда, бүкіл әдістердің жоғары беттік сезгіштігі келесі фактімен байланысты: 5-2000 эВ энергиялар облысындағы электрондар серпімді емес шашыраудың жоғары ықтималдығына ие болады. Сондықтан, егер тіркелетін электрондардың энергиясы қатты дененің бетімен әрекеттесу кезінде өзгермеген болса, онда электрондардың өте

жұқа беткі қабаттан өткеніне сенімді болуға болады, сондықтан бұл әдіс беттік сезгіш болып есептеледі. Екінші себеп келесімен байланысты: әдістің беттік сезгіштігі электрондардың энергиясын өлшеуге негізделгендіктен, бұл әдістердің көпшілігі үшін белгілі бір түрдегі энергия талдағыштары қажет. Сонымен, сәйкесті эксперименттік қондырғының бұл құраушысы көптеген әдістер үшін де ортақ болып табылады [2].

Заманауи наноэлектроника нанообъектілер мен наножүйелердің құрылымы мен құрамын анықтауға мүмкіндік беретін зерттеу әдістерін дамытуды талап етеді. Қажетті диагностиканың перспективті базасы қатты дененің тереңдігі бойынша нанометрлік ажыратуымен сипатталатын электрондық спектроскопия әдістері (ЭСӘ) болып табылады. ЭСӘ –дегі талдау тереңдігі 0,5-2 нм құрайды.

Электронды спектроскопия қазіргі уақытта кеңінен қолданылатын және белсенді дамып келе жатқан қатты денелердің беттік облысының физика-химиялық қасиеттерін зерттеу әдістерінің бірі болып табылады. ЭСӘ-тің дамуы К.Зигбанның зерттеулерінде бастау алды [3]. ЭСӘ өзінің даму жылдарында қатты заттардың құрамы мен электронды құрылымын анықтаудың қуатты әдісіне айналды. Бұл әдістердің негізінде сыртқы сәулеленудің әсерінен зерттелетін заттың бетінен шығарылған электрондардың энергия бойынша талдау жатыр. Электрондық спектрометр энергиялары мен бұрыштардың кең жиынына ие кіретін бөлшектерден энергиялары анықталған тар аймақта жататын бөлшектерді бөліп алады. Спектрометрдің негізгі талдаушы элементі - энергия талдағыш болып табылады.

Микро- және наноқұрылымдарды қалыптастырудың *in-situ* процестерін талдаудың ең тиімді физикалық әдістерінің бірі ретінде беттік оже-спектроскопия үшін жоғары жарық күші (сезгіштік) және ажырату қабілеттілігіне ие болатын аксиалды-симметриялы энергия талдағыштар неғұрлым жарамды болып табылады.

Электрондық және иондық оптикада қолданылатын тоғыстаушы элементтердің басым көпшілігі скалярлық потенциалдармен сипаттала алатын осьтік симметриялы

электрстатикалық және (немесе) магнит өрістерін құрайды [4]. Электрондық аспаптардың негізгі міндеттері - электронды ағындарды электрлік және магниттік өрістермен қалыптастыру, тоғыстау және ауытқыту болып табылады. Бұл мәселемен корпускулалық оптика айналысады. Корпускулалық оптиканы зерттеу пәні – траекториялар жиыны және олардың қасиеттері болып табылады [5]. Корпускулалық оптиканың принциптері физикалық электрониканың және оның электронды спектроскопия, массалық талдау, нанотехнология және т.б. сияқты бөлімдерінің негізінде жатыр.

20 ғасырдың 80-ші жылдарының басында қолданыстағы аспаптарды талдау сол кезде ажырату мен сезгіштік бойынша ең жақсы талдағыш профессор В.В. Зашкварамен ұсынылған цилиндрлік айна екендігін көрсетті. Бұл талдағыш үлгі мен детектордың симметрия осінде орналасқан кезде меридионалды  $\theta$  бұрыш бойынша екінші ретті тоғыстау режимінде жұмыс істейді [6]. Цилиндрлік айнаның қолданылуы бүгінгі күнге дейін өзекті.

Заманауи спектрлік талдаудың өзекті мәселелеріне қамтамасыз ететін құрылғының сезгіштігіне, оның ажырату қабілеттілігіне, ықшамдылығына, сондай-ақ бірнеше зерттеу әдістерін кеңістіктік біріктіру қажеттілігіне қойылатын талаптардың жоғарылауы жағдайында шешілуін қажет ететін есептер жатады. Заманауи технологиялардың одан әрі ілгерілеуі, сондай-ақ нанотехнологияларның дамуы үлкен дәрежеде диагностикалық құралдардың жағдайымен анықталады. Сонымен зарядталған бөлшектердің ағындарының энергия бойынша талдауы теорияны одан әрі дамыту арқылы қолданыстағы немесе сапалы жаңа корпускулалы-оптикалық жүйелерді одан әрі жетілдіруін талап етеді.

Корпускулалық оптика саласындағы соңғы белгілі жұмыстарға шолу электронды-оптикалық сұлбалардың одан әрі дамуына белгілі электрстатикалық айналарды әр түрлі модернизациялау және біріктіру арқылы қол жеткізуге болатындығын көрсетеді. Қажетті корпускулалы-оптикалық қасиеттерге ие энергия талдау жүйелерін құру тәсілдерінің ғылыми жаңалығы - симметрия осі бойымен біртекті емес электрстатикалық өрістерді қолдану болып табылады.

# 1 КОРПУСКУЛАЛЫ-ОПТИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДІ ЕСЕПТЕУДІҢ ЗАМАНАУИ МӘСЕЛЕЛЕРІ

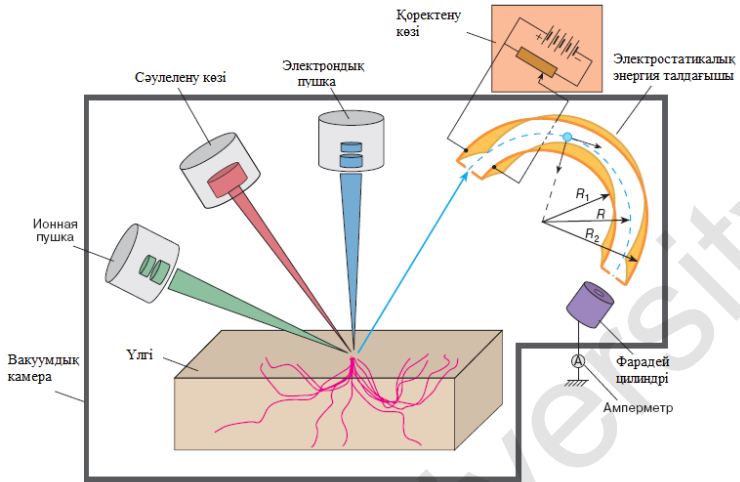
## 1.1 Зарядталған бөлшектер ағындарының энергия талдағыштарына шолу

Бетті талдаудың негізгі есептерінің бірі - белгілі бір қалыңдықтағы беттің немесе беткі қабаттың сапалық және сандық элементтік құрамын анықтау болып табылады. Бет дегеніміз әдетте, қалыңдығы  $\sim 1-10$  атомдық қабаттарына құрылатын материал көлемінің бір бөлігі [1, 6 б.].

Қатты денелердің жұқа беткі қабатына ерекше назар аударуы заманауи материалтанудың сипатты ерекшеліктерінің бірі болып табылады. Себебі беттің құрылымы мен құрамы қатты денелердің көптеген физикалық және химиялық қасиеттерін анықтайды және көптеген процестер мен құбылыстарда үлкен технологиялық маңызы бар ерекше рөл атқарады. Сонымен қатар, қазіргі уақытта нанотехнологиялық төңкерістің бастауы деп аталады. Қарапайым макроскопиялық денелермен салыстырғанда наноғылым объектілеріне тән сипатты белгілердің бірі - жүйе атомдарының толық санымен салыстырғандағы бетте жатқан атомдардың салыстырмалы үлесінің күрт артуы болып табылады [7].

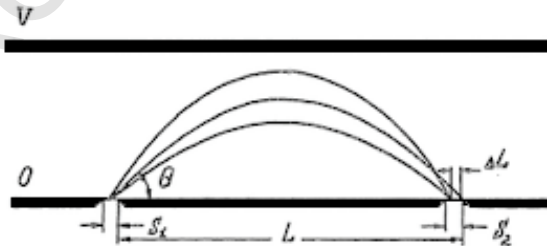
Эксперименттік сұлбаның маңызды бөлігі энергия талдағыш болып табылады, бұл таңдалған интервалдағы энергияға ие зарядталған бөлшектердің тоқ тығыздығын анықтауға мүмкіндік беретін құрылғы. Энергия талдағыш ағындағы зарядталған бөлшектердің энергия бойынша қалай таралатын анықтауға мүмкіндік береді [8]. Принципті эксперименттік сұлба 1.1-суретте көрсетілген.

Қазіргі уақытта бетті талдаудың көптеген әдістері бар. Технологиялық қажеттіліктерді қанағаттандыру үшін үнемі жаңа әдістер мен құрылғылар құрастырылып жасалады. Энергия талдау мақсатында келесі геометриялы өрістер және олардың суперпозициялары негізіндегі электрстатикалық аспаптар жиі қолданылады: сфералық өріс, цилиндрлік өріс, гиперболалық өріс, біртекті өріс және т.б. [9].



1.1-сурет. Электрондардың және жеңіл иондардың энергетикалық спектрлерін өлшеу бойынша эксперименттің стандарттық сұлбасы

Біртекті өрістің негізіндегі энергия талдағыш, яғни жазық айна бір бағытта тоғыстауды береді (1.2-сурет). Зарядталған бөлшектер ағындарының энергия талдауында кеңінен қолданылу себептерінің бірі - конструкцияның қарапайымдылығы болып табылады. Энергия талдағыштың жұмыс істеу принципі біртекті электрлік өрістің дисперсиялық қасиеттерін қолдануға негізделген.



1.2-сурет. Жазық айнадағы электрондардың траекториялары

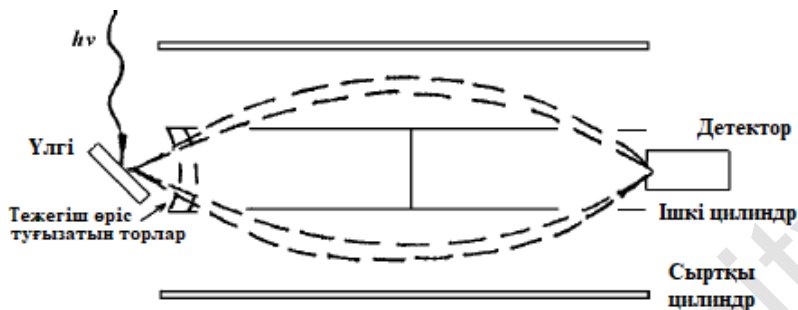
[10] жұмыста кез келген кіру бұрышы үшін екінші ретті тоғыстауға ие жаңа модификациялы жазық талдағыш ұсынылды. Үлкен емес кіру бұрышына ие ұсынылған талдағыш төмен кернеу мәндері кезінде артықшылыққа ие. Талдағыш МэВ диапазонындағы энергия талдауы үшін өте пайдалы. [11, 12] еңбектерінде төмен энергиялы электронды спектроскопияға арналған  $45^0$  –тық жазық электрстатикалық энергия талдағышы ұсынылған.

Бір шоқта қалыптасқан зарядталған бөлшектердің әр түрлі энергиялары мен бұрыштарын өлшейтін бірегей құрылғы - қос каскадты жазық айна [13] жұмыста сипатталған. Қарама-қарсы полярлығына ие бөлшектерді бөліп анықтау және тіркеу мүмкіндігі оларды бір мезгілде өлшеуге мүмкіндік береді. Бөлшектердің траекториясы үшін теңдеулер алынып, егжей-тегжейлі талқыланды. Бөлшектерді анықтауға сәйкесті ажырату үшін өрнектер келтірілген.

Фишкова Т.Я. [14] жұмыста моноэнергиялық электронды шоқты алуға арналған электрстатикалық жүйені ұсынған. Ол жабық кесіктерге ие жазық айна түріндегі энергия бойынша негізгі сүзгіштен және энергия бойынша бастапқы шашырауды компенсациялайтын қосымша жазық конденсатордан тұрады. Бұл өрістердің кернеуліктер байланысының аналитикалық формуласы алынған. Жүйенің сандық есептеулері жүргізілді, олар тоғыстық сызықтағы электронды шоқтағы энергияның шашырауы бастапқы жылу шашырауымен салыстырғанда бір реттілікке азайғанын көрсетті.

Цилиндрлік айна (ЦА) типті зарядталған бөлшектер ағындарының энергия талдағышы кеңінен қолданылады. Талдағыш жоғары электронды-оптикалық сипаттамаларға ие және конструкциясы қарапайым (1.3-сурет).

[15] жұмыста үлгінің бетін жұқа бірінші ретті сәулеленумен сканерлеу кезінде кесіктік электродтарға ие ЦА-ның параметрлері анықталған. Есеп электронды оптиканың екі өлшемді есептерін есептеуге арналған бағдарламалар бойынша сандық әдіспен шешілген.



1.3-сурет. Цилиндрлік типті талдағыштың электронды-оптикалық сұлбасы

[16] жұмыста Трубицын А.А. қарапайым (және технологиялық) фигуралар - цилиндрлер мен сақиналардың комбинациясы болып табылатын энергия талдағыштың электронды – оптикалық сұлбасы ұсынылған. Талдағыш  $\alpha_0=90^\circ$  кезінде екінші ретті бұрыштық тоғыстауды қамтамасыз етеді. Мұндай тоғыстау бұрышы бұрыштық өлшеулердің тиімді диаграммасын құруға мүмкіндік береді, ал екінші ретті тоғыстау бірінші ретті тоғыстау жағдайымен салыстырғанда жарық күші мен ажырату қабілеттілігінің жоғары мәндерін бір уақытта талаптағы қарама-қайшылықтың едәуір әлсіреуін білдіреді.

[17] жұмыста бұрыштық тоғыстаудың екі режиміне ие оже-спекроскопия үшін цилиндрлік айналы талдағыштың (ЦАТ) сұлбасы есептелген. Сондықтан зерттеулер кезінде үлгінің бетінің оже-талдауын екі әдісті қолдануға болады.

[18] жұмыс жұқа қабықшаларды вакуумдық тұндыру жүйелерінде қолданылатын төмен энергиялы иондардың шашырау спектрометріне арналған ықшамды цилиндрлік шағылдырушы айналы талдағышты құрастыруға арналған. Энергия талдағыштың конструкциясы эллипсоидты айналы талдағышқа ұқсас, ол орташа қисықтық радиусы 4,0 см және сектор бұрышы  $70^\circ$  болатын сектор түріндегі электрстатикалық шағылдырушы айнадан және жоғары энергиялы сүзгіштен және екі саңылаудан құрылады. Орташа энергиялық ажырату 10 эВ

энергиялар аймақта және иондарының 800 эВ бастапқы энергиясы кезінде алынды.

[19] мақалада «ось-ось» конфигурациялы параллель цилиндрлік айналы талдағышының (ПЦАТ) конструкциясы сипатталған. Талдағыш параллель жинау режимінде энергиялардың кең спектрін қамтиды. Екінші ретті тоғыстау режимі жоғары энергиялы ажыратуымен энергиялардың шектеулі диапазонында қамтамасыз етіледі. ПЦАТ параллель жинау және екінші ретті режимдер арасында жұмыс істейді.

[20] жұмыстың мақсаты көлемді зарядқа ие электронды шоқтардың энергиялық шашырауын өлшеу үшін жоғары ажыратуға ие шағылдырушы өріс негізінде ықшамды энергия талдағышты құрастыру болып табылады. Бұл энергия талдағыш кеңістіктік зарядтың әсерімен, траектория шоғымен, диафрагмалардағы әсерлермен және т.б. байланысты қайта тоғыстаушы әсерін болдырмау үшін цилиндрлік электродқа ие. Бір бөлшекті модельдеу көрсеткендей, бұл энергия талдағышы төмен энергиялы электронды шоқтар үшін өте жақсы бірнеше киловольт ажыратуға ие және үлкен шашырау бұрыштарына ие. Энергия талдағыш 2,5 кэВ, 60 мА бөлшектер шоқтарында сыналды. Өлшенген энергия шашырау – шашыраудың негізгі энергиялық көздерін, яғни Берш эффектісі мен бойлық әлсіреуді ескеріп, стереотикалық есептеулермен салыстырылды.

Модификацияланған ЦАТ-тың электрондық-оптикалық қасиеттерінің есептеулері [21] жұмыста ұсынылған. Талдағыш конустық кесіктерге ие екі концентрлік цилиндрден тұрады, олардың толық емес бұрыштары  $30^0$  және  $90^0$  аралығында жатыр. Конустық кесіктерге ие ЦАТ жоғары дисперсияға және екінші ретті тоғыстаушы қасиеттерге ие екендігі көрсетілген. Ұсынылған талдағыш цилиндрлік айналардың атом физикасында мен беттік физикада қолданысын кеңейтеді, себебі конустық кесіктер үлгіні сәулелендіру үшін, сонымен қатар электрондарды детектірлеу үшін қолайлы геометриялық жағдайларды қамтамасыз етеді.

[22] жұмыста зарядталған бөлшектер шоқтарының энергиялары бойынша сүзетін құрылғы ұсынылып, теориялық түрде зерттелген. Ол цилиндрлік өріс құрушы электродтан

тұрады, оның меридионалды жазықтығында жазық және жерге тұйықталған электрод, ал ұштарында шоқтың кіруі мен шығуы жүзеге асырылатын жерге тұйықталған диафрагмалар орналасқан. Жүйенің геометриясының өзгеруінің кең диапазонында екі жағдай үшін параметрлер есептелген: шоқтың жазық электродта қос тоғыстау және шоқтың параллель берілу режимі.

Simion 3D бағдарламасының 6.0 нұсқасын қолдана отырып,  $127^0$ -тық ЦАТ-тың оптикалық қасиеттерін зерттеу [23]-жұмыста жүргізілді. Талдағыш төмен энергиялы иондардың шашырау бойынша эксперименттерде қолдануға арналған.  $(x, y)$  координаталарына ие нысана жазықтығындағы  $\Omega$  қабылдаудың денелік бұрышының бөлшектің салыстырмалы  $\epsilon$  энергиясына тәуелділігі талдағыштың оптикалық қасиеттерін толық сипаттайды. Нысана жазықтығындағы әр түрлі нүктелерінен эмиттерленген иондардың траекториясын есептеулерден  $\Omega(X, Y)$  функциясы анықталған. Сфералық абберрацияның энергияны өлшеу қателігіне әсері эксперименттік түрде анықталған.

[24] жұмыста энергия шығындарының иондық спектрометрі жобаланған. Аспаптағы энергия талдағышы Мацуд пластиналармен жабдықталған  $180^0$ -тық цилиндрлік конденсатордан құрылады. Оның артықшылығы мынада - цилиндрлік конденсатордың екі ұштарында орналасқан Мацуд пластиналардағы электрлік потенциалды өзгерту арқылы тоғыстауға қол жеткізуге болады. Бұл әдістің көмегімен энергия талдағыш әдеттегі сфералық конденсаторға баламалы болады және шеттік өрісті жояды.

[25] жұмыста дрейфтік кеңістікке ие  $210^0$ -тық ЦАТ екінші ретті тоғыстауды қамтамасыз ететіндігі эксперименттік түрде дәлелденген. Талдағыштың қасиеттері цилиндрлердің кіру мен шығу маңындағы шеттік өрістерден күшті тәуелді болады.

Бөлшектердің кванттық шашырауы бойынша эксперименттерде электронды үлкен көздер мен детекторлардың айналуынан құтылу үшін [26] жұмыста келесі аспап жасалды, онда электронды шоқтың айналуы үш үлкен емес ЦАТ-тарды тізбектей комбинациялау жолымен қол жеткізілді. Бірінші

талдағыш қозғалмайды, ал қалған екеуі бірінші цилиндрдің шығыс осі маңындағы бірге айналады.

[27] жұмыста иондардың соңғы шығындарын өлшеу үшін цилиндрлік типті электрстатикалық энергия талдағышының ерекшеліктері сипатталған. Талдағыш жылдамдытар кеңістігінің конустық аймағында иондардың таралу тығыздығы туралы ақпаратты қамтамасыз етеді.

[28] жұмыс электрстатикалық энергия талдағыштың сұлбасын сипаттауға арналған, бұл аспап зарядталған бөлшектердің энергиялық спектрін энергиялардың кең диапазонында және азимут бағыттардың барлық диапазонында бір уақытта тіркеуге мүмкіндік береді. Талдағыш ЦАТ-қа ұқсас, бірақ потенциалдың сызықтық өзгерісі сыртқы цилиндрдің өстік бағытында қолданылады. Талдағышты екінші ретті тоғыстау режимінде жоғары энергия ажыратуымен энергиялардың тар диапазонын талдау үшін пайдалануға болады.

[29] жұмыста кинетикалық энергиялары 15 кэВ-қа дейін болатын электрондар үшін жоғары кернеулі цилиндрлік секторлық энергия талдағышы жасалды. Ол әсіресе рентген және ультракүлгін фотоэлектрондық спектроскопия, оже-электронды спектроскопия және электронды спектроскопия үшін қолайлы. Талдағыш  $90^0$  –қа ауытқумен цилиндрлік секторға негізделген. Саңылаулардың қашықтығы 300 мм, кіріс төрт элементті тежегіш линзалық жүйесі үлгіден 50 мм ара-қашықтықта орналасқан. Нәтижесі – әр түрлі әдістемелі көп мақсатты эксперименттерге оңай интеграцияланатын өте ықшамды талдағыш конструкциясы болып табылады. Электрониканың төменгі шу деңгейі сызықты емес линзаларды қолданылуымен 0-ден 15 кэВ-ке дейінгі энергияларды үздіксіз сканерлеуге мүмкіндік береді. Электронды пушка, ультракүлгін газ разрядты шам және қоздыру көзі ретінде күшті рентген синхротронды сәулеленудің көмегімен энергия мен трансмиссия бойынша ажыратуға сәйкес талдағыштың мүмкіндіктері көрсетілген.

ЦА негізінде көптеген көпкаскадты энергия талдағыштар құрастырылды, олардың корпускулалы-оптикалық параметрлері жеке ЦА-ның параметрлерінен жоғары. Мысалы, [30] жұмыста жоғары энергия ажыратуымен шашырау бұрыштарының толық

диапазонында ( $0^{\circ}$ - $180^{\circ}$ ) электрондардың энергиялық және бұрыштық таралуын бір уақытта өлшеуге арналған электрстатикалық электронды спектрометр сұлбасы берілген. Талдағыштың бірінші және екінші сатылары цилиндрлік симметриялы үш бөліктен құрылады. Талдағыштың корпусы мен ішкі цилиндр жер потенциалының астында, ал кесіктік ұштары бар сыртқы цилиндр теріс потенциалдың астында. Электрондық спектрометрдің бірінші сатысы нүктелік көзден  $90^{\circ}$  бұрыш маңында шыққан электрондарды осьте тоғыстық нүктеге тоғыстайды. Мұндай кіру бұрышы қарапайым ЦАТ-та мүмкін емес. Әрі қарай екінші саты арқылы өтіп, сақинаға тоғысталады.

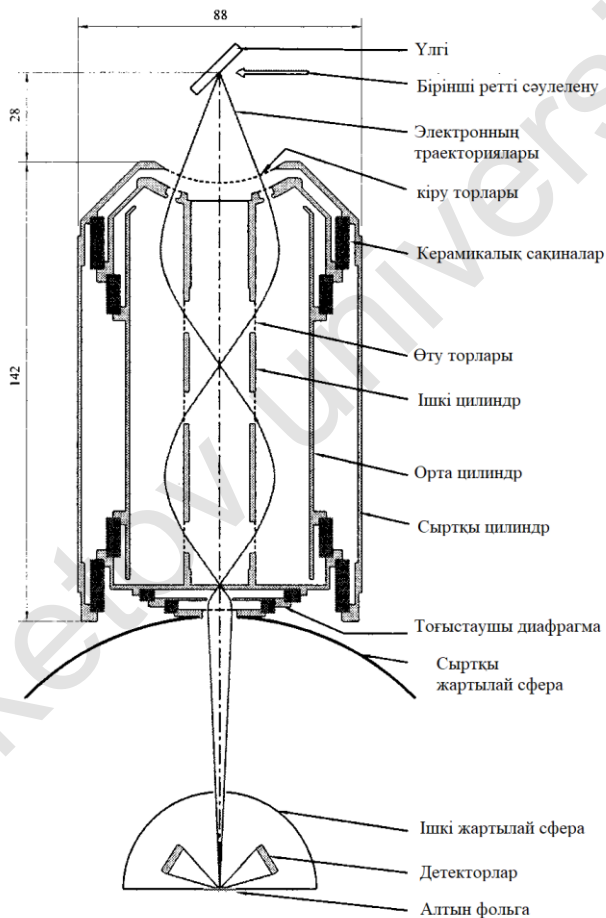
[31] мақалада қоскаскадты ЦАТ-тың конструкциясы сипатталған. Диаметрі 1,5 дюймнен (30 мм) кем электрондық энергия талдағыш өнімділігі бойынша ұқсас диаметрге ие бір каскадты ЦАТ-тан асып түседі.

[32] жұмыста спин-поляризацияланған оже-электронды спектроскопияға арналған қоскаскадты ЦАТ ұсынылған. Талдағыш жоғары трансмиссияға, электрондардың үлкен емес бұрыштық эмиссиясына және үлкен тоғыстық ұзындыққа ие. Энергия талдағыштың ықшамды классикалық Мотта детекторымен үйлесуі оже-спектрометрді өте жоғары тиімділігін қамтамасыз етеді (1.4-сурет).

[33] жұмыс сыртқы диаметрі 26 мм болатын миниатюралық қоскаскадты цилиндрлік айналы электронды энергия талдағышын (ҚҚЦАТ) құрастыруға арналған. ҚҚЦАТ электр өрісі үшін экраннан, ішкі және сыртқы цилиндрлерден, диаметрлері 2,0 мм болатын екі микросаңылаулардан және электрондық көбейткіштен құрылады. ҚҚЦАТ оже-фотоэлектрондық сәйкестіктер спектроскопиясындағы талдауларға арналған осьтік симметриялық айналы электронды талдағышқа жиналады. ҚҚЦАТ-тың электронды-энергиялық ажыратуы  $E/\Delta E=20$  құрайды. Бұл  $E/\Delta E=12$  мән оже-фотоэлектрондық сәйкестік спектроскопиясындағы алдыңғы талдағышта қолданылған миниатюрлі бір каскадты ЦАТ-тың мәнінен жоғары.

[34] жұмыста оже-электронды спектроскопияға (ОЭС) арналған электронды энергия талдағышының жаңа типі

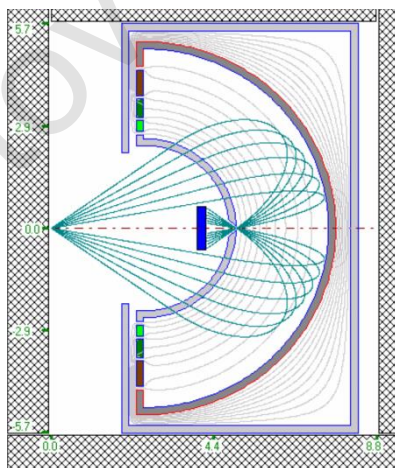
сипатталған. Ол қоздырылған негізден эмиттерленген екінші ретті электрондарды бөлу үшін үш коаксиалды цилиндрлік электродтардан тұрады. Талдағыш ішіндегі электрондардың траекториясынан құрылатын негіздер қысқаша сипатталған, конструкцияның геометриялық параметрлерін есептеу ақпараттары ұсынылған.



1.4-сурет. Қоскасадты ЦАТ-тың сұлбасы [32]

[35] жұмыста қатты денелердегі атомдары мен молекулаларындағы электронды процестерді зерттеуге арналған электронды энергия талдағыштың сұлбасы және конструкциясы сипатталған. Талдағыш  $180^{\circ}$ -ты жартылай сфералы дефлектордан және бес кіріс оптикалық элементтерден тұрады. Талдағыштың тоғыстаушы сипаттамалары «SIMION» электрондардың траекторияларын модельдеу бағдарламасы көмегімен зерттелді. Жартылай сфералы дефлекторға линзалардың кіру жүйесі төмен энергиялы электрондардың жоғары жинау қабілетін қамтамасыз етуге арналған. Линзалар жүйесі үш линзадан, үдеткіш немесе баяулаушы объективтен, кіру және шығу саңылауларынан тұрады. Линзалар жүйесінің кіру және шығу саңылаулары 2 мм диаметрге ие, ал бұл өз кезекте өрістегі аберрацияларды азайтуға көмектеседі.

Сфералық айна (СА) екі бағыттағы тоғыстауды қамтамасыз ететін корпускулалы-оптикалық жүйелерге жатады (1.5-сурет). Жоғары параметрлерінің арқасында талдағыштың бұл түрі әр түрлі зерттеу салаларында кеңінен қолданылады. Бірқатар компаниялар талдағыш ретінде СА болатын электронды спектрометрлерді шығарады.



1.5-сурет. Шеткі өрістің түзетуіне ие реал сфералық айнаның электрондық-оптикалық сұлбасы

Спектрометрдің симметрия осінде орналасқан нүктелік көз үшін идеал бұрыштық кеңістіктік тоғыстау жағдайында зарядталған бөлшектер ағындарының СА типті электрстатикалық энергия талдағышының уақытты-ұшу сипаттамалары [36] жұмыста зерттелген. Бөлшектің көзден осыөте орналасқан идеал тоғысқа дейінгі қозғалыс уақыты бірінші жуықтауда осыөке нормаль маңында ұшу бағытынан байланысты емес екендігі көрсетілген. Осылайша, ұшу уақыты бойынша тоғыстау режимі эмиссияның әрбір актісі жеке тіркелетін ЭСӘ-рінде СА-ны тиімді қолдануға мүмкіндік береді.

[37] жұмыста бұрыштық және спин-ажыратулы фотоэлектрондық спектроскопияға арналған жартылай сфералы электронды энергия талдағышының жаңа типі ұсынылған. Талдағыш екі өлшемді детектормен жазу арқылы бөлшектің спинін анықтайтын Мотта мини-поляриметрін қолдану арқылы бұрыштық ажыратуға ие спектрлерді алуға мүмкіндік береді. Сұлбаның жалпы идеялары мен техникалық шешімдері талқыланды. Ау бетінен тест нәтижелері ұсынылған.

[38] мақалада рентгендік фотоэлектрондық дифракцияны және рентгендік фотоэлектрондық голографияны өлшеуге арналған оригиналды аспаптың сұлбасы ұсынылған. Ықшамды электронды спектрометр жоғары сезгіштікпен, сонымен қатар жоғары энергиялық және кеңістіктік ажыратуымен сипатталады. Конструкция екінші ретті кеңістіктік тоғыстауға ие осыөтік симметриялы  $90^0$ -ты секторлы сфералық дефлектордың және қуыс конустық баяулауышы иммерсиялық линзадан құрылады. Фотоэлектрондардың энергиялар диапазоны 0-ден бірнеше мың электронды вольтқа дейін өзгереді, сондықтан талдағышты валенттілік және негізгі электрондық деңгейлерді зерттеу үшін пайдалануға болады. Талдағыштың энергиялық ажыратуы

$\frac{\Delta E}{E} = 10^{-4}$ . Бұл ажыратуды үлгінің 4 мм-ге дейін немесе одан да көп созылыңқы аймағынан,  $60^0$ -қа дейін бастапқы полярлы немесе азимут бұрыштар диапазонында шығарылған электрондар үшін  $0,25^0$  бұрыштық ажыратуымен тәжірибелерде қол жеткізуге болады. Сонымен қатар, бұл ажыратуға 0,5 ср. денелік бұрышпен спектромикроскопиялық режимде қол жеткізуге болады.



Аспаптың негізгі мақсат - беттен шашыраған және бірнеше ондаған эВ-дан 2000 эВ-қа дейінгі энергиялы электрондарды бір уақытта тіркеу болып табылады. Гиперболалық шағылдырушы өріске жақын прототип құрастырылды. Энергиялық ажырату бірнеше эВ құрайды және жинау тиімділігі 2пср –нан 0,05% құрайды. Спектрлерді алу кезінде мұндай маңызды жетілдіру оже- және фотоэлектрондық спектроскопияға көптеген мүмкіндіктер береді.

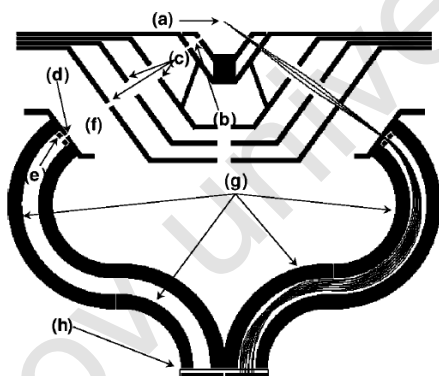
Екінші ретті тоғыстау - бұл дисперсиялық типті электронды энергия талдағыштарының қасиеті болып табылады, себебі мұндай талдағыштар үлкен бұрыштардың диапазонын немесе, керісінше, жоғары энергия ажыратуына ие [43]. Гиперболалық талдағыш үшін екінші ретті тоғыстау шарттары алынды, бұл энергияның үлкен диапазонын параллель жинауға мүмкіндік береді және оны беттік талдау үшін, мысалы, оже-спектроскопияда қолайлы етеді.

Бұрыштық ажыратуға ие электрстатикалық энергия талдағышының салыстырмалы түрде жаңа типі конустық электрстатикалық призмадан және позиционды-сезгіш детектордан тұратын талдағыштан құрылады және фотоэлектрлік спектроскопияға арналған [44]. Талдағыштың сипаттамалары гелий-разрядтық шамын қолдана отырып, Ag фотоэлектрондық спектрлерін өлшеу арқылы тексерілген.  $E=5,6$  эВ энергиясы үшін  $3^0$  бұрыштық ажыратуға қол жеткізілді.  $E = 1,4$  эВ кезіндегі ең күшті энергиялық ажырату  $\Delta E/E = 0,043$  құрайды.

[45] жұмыста параллельді электронды-магниттік қораптық талдағыштың сұлбасы берілген. Бұл талдағыштағы бақылау энергиясы 50 эВ-тан 2500 эВ-қа дейін өзгереді. Модельдеу нәтижелері көрсеткендей, талдағыш  $\pm 3^0$  полярлы бұрыштық шашырау үшін осьтен электрондардың негізгі шоғының жеткілікті ара-қашықтықта орналасқан жазық горизонтальді детектор пластинасы жағдайында 0,33% (минимум 0,147% және максимум 0,622%) орташа салыстырмалы энергиялы ажыратуға ие. Талдағышта екінші ретті (немесе одан жоғары) тоғыстау жүзеге асырылады. Талдағыш жеткілікті кішкентай, ал бұл өз кезекте оның сканерлеуші оже-электронды және электронды микроскоптардың үлгі камерасында қосымша ретінде жұмыс

істеуін болжайды. Талдағыш сұлбасының өлшемдері: ұзындығы 90 мм және биіктігі 40 мм.

[46] мақалада жоғары трансмиссияға ие оригиналды электрстатикалық «қос тороидалды» электронды энергия талдағыштың сұлбасы сипатталған (1.7-сурет). Қос тороидалды талдағыш екі өлшемді позиционды-сезгіш детектор көмегімен электрондардың кинетикалық энергиясын және бұрыштық таралуын жоғары ажыратуымен және жоғары жарық күшімен бір уақытта өлшеуге мүмкіндік береді. Электродтардың нақты пішіні аналитикалық түрде, сондай-ақ электрондардың траекторияларын сандық есептеу арқылы алынады.



1.7-сурет. «Қос тороидалды» электронды энергия талдағыштағы электрондардың траекториялары

[47] жұмыста сипатталған тороидалды электрстатикалық талдағыш беттерді құрылымдық талдау үшін орташа энергиялы иондарды шашыратуға арналған. Берілген талдағыш 16 мм кең электрод аралық ара-қашықтыққа және кернеудің тұрақты мәні кезінде берілу энергиясының 10% энергия диапазонына ие. Талдағыш айналмалы үстелге горизонталды орнатылған және нақты анықталған бұрыштармен шашыраған иондарды қабылдайды. Жақсы энергиялы ажыратуды үшін 40-50мм кеңістіктік ажыратуымен фотондарды санау жүйесі (PEAS, Hamamatsu Photonics) және үш сатылы микроканалды пластина

біріктіріліп қолданылды. Тороидалды спектрометрдегі электр өрістері, оның ішінде шашыраған өріс ақырлы элементтер әдісімен есептелді. Талдағыш арқылы өткен электрондардың траекториялары Монте-Карло әдісін қолдана отырып есептелді. Сонымен, геометрияның оптималды шарттары, кіру және шығу саңылауларының өлшемдері анықталды.

[48] жұмыста сыртқы тороидалды электродтан құрылатын жаңа айналы аксиалды-симметриялы электрстатикалық энергия талдағышы ұсынылған. Тороидалды геометрия талдағыштың жақсы тоғыстаушы қасиеттерін қамтамасыз етеді және жоғары энергиялық ажыратуымен жоғары бұрыштық қабылдауға қол жеткізуге мүмкіндік береді. Талдағыштың тоғыстаушы қасиеттері сыртқы электродтың пішіні қарапайым цилиндрлік және конустық беттерге жуықтаған кезде анықталды. Тороидалды айналы талдағыштың әр түрлі жұмыс режимдері зерттелген, оның ішінде оны көп сатылы құрылғының бөлігі ретінде пайдалану мүмкіндігі қарастырылған.

Тороидалды энергия-бұрыштық фотоэмиссиялық спектрометр [49] жұмыста сипатталған. Аспап энергия және бұрыш бойынша мультианықтауға ие, яғни бүкіл жартылай сфера бойынша фотоэмиссияны жылдам өлшеуге ықпал етеді. Аспап бұрыштық ажыратуға фотоэмиссиялық спектроскопияны қолдана отырып, зоналық құрылымын зерттеу және Ферми бетінің картаға түсіру үшін өте қолайлы.

[50] жұмыста массалардың квадрупольдік сүзгіштің аналитикалық сипаттамаларын жақсарту мақсатында қолданылатын иондық ағынның аралық тоғыстауын және параллель шығуына ие иондық-оптикалық жүйелердің конструкциялары ұсынып, модельдеу жүргізілген.

Электрстатикалық линза электронды оптикада қолданысқа ие болып, айналмалы симметриялы электродтардың кез-келген үйлесуі электрстатикалық өрісті құрайды және зарядталған бөлшектердің өрісте симметрия осі бойымен қозғалуына мүмкіндік береді.

Оже-электрондық және иондық сәйкестіліктерді өлшеуге арналған қос тороидалды электронды энергия талдағышқа кіріктіруін ескере отырып, [51] жұмыста төрт элементтен

құралған конустық электронды линза жасалды. Электрондардың траекториясын сандық модельдеуді қолдана отырып, линзаның конструкциясын есептеу мультисәйкестіліктер режимінде жоғары ажырату қабілеттілігімен электрондарды талдау тұрғысынан толығымен жүргізілді. Берілген электронды-оптикалық жүйенің дизайны, конструкциясы және эксперименттік сипаттамалық сатылары сипатталған. Мұндай мультисәйкестіліктер эксперименттерді жүргізу кезінде синхротронды сәулелену көздерінің үшінші буынының маңыздылығына ерекше назар аударылады.

[52] жұмыста «ось-ось», «ось-сақина», «сақина-ось», «сақина-сақина» типті жүйелерді құрайтын қуыс электрстатикалық линзаларды және екінші ретті кеңістіктік тоғысталуға ие аксиалды-симметриялы секторлық сфералық дефлектордың әр түрлі конфигурацияларын қолданылатын энергия талдаушы жүйелердің компьютерлік модельдеу нәтижелері берілген. Қуыс иммерсиялық линзалардың екінші ретті тоғыстауға ие сфералық дефлектор жүйелерімен үйлесуі бұл жүйелердің жоғары энергиялық ажыратулы зарядталған бөлшектердің спектроскопиясында жоғары тиімділігін қамтамасыз ететіні көрсетілген. Бөлшектердің энергия бойынша бөлінуі дефлекторда жүреді, мұнда бөлшектердің энергиясы минималды және траекториялардың релятивистік ығысуы болмайды, соның арқасында спектрометрдің энергия шкаласы абсолютті сызықты болады және оның қателігі тек басқарушы электрстатикалық потенциалының қателігімен анықталады. Зерттелген жүйелер негізінде бірнеше жүзден ондаған мың эВ диапазонында энергия бойынша ажырату күшіне ықшамды жарық күшті спектрометрлерді құрастыруға болады.

Зарядталған бөлшектердің шоғының қарқындылығын арттыру үшін теориялық тұрғыдан [53] жұмыста үш коаксиалды цилиндрден құрылатын электрстатикалық линза зерттелген, линза бір нүктеде оське жақын шоқтарды (осьтік симметриялық линзаның көмегімен), сондай-ақ осьтен алыстатылған шоқтарды (коаксиалды цилиндрлік линзаның көмегімен) тоғыстайды. Мұндай аралас линзаның параметрлері сандық түрде есептелген. Кеңінен қолданылатын дербес осьтік симметриялық линзамен

салыстырғанда бөлшектер шоғының қарқындылығындағы ұтыс анықталды.

[54] жұмыс симметрияның ортақ жазықтығына ие екі өлшемді электрстатикалық өрістері бар тізбектей түрде орналасқан айналардан құрылатын жүйенің уақыт-ұшу қасиеттерін есептеуге арналған. Зарядталған бөлшектер шоғының шашырату бұрышы мен энергия шашыраудың уақытты-ұшу тоғыстауының шарттары анықталды. Шоқтардың сыртқы және ішкі шағылуымен жүретін цилиндрлік айналардан құрылатын уақыт-ұшу спектрометрінің сұлбалары есептелген.

[55] жұмыста фотоэлектрондардың шағылуы және тоғысталуы үшін электрстатикалық өрісті қолданатын жаңа уақыт-ұшу фотоэлектрондық энергия талдағышы ұсынылған. Жоғары сапалы эллипсоидты тордың көмегімен фотоэлектрондарды жоғары тиімділікпен жинап, детекторға бағыттауға болады. Эллипсоидты айналы талдағыштағы кеңістіктік заряд пен созылықты көздерінің мәселелері қарастырылады. Ұсынылған спектрометр бір және көп фотонды ионизация процестерін талдайды және энергияның кең диапазонында жұмыс істейді. Эксперименттік мәліметтер шоқтарды жинаудың жоғары тиімділігін көрсетеді. 10-7 Торрдан кем вакуум кезінде спектрлер алынды.

Газ ағындарының, шаң бөлшектерінің және микрометеороидтардың элементтік құрамын зерттеуге арналған уақытша-ұшу масс-спектрометрлердің конструкциялары [56] жұмыста сипатталған. Масс-спектрометр параметрлерін есептеу электр өрісін қалыптастырушы электродтар потенциалдарының таралу заңын анықтауға негізделген.

[57] жұмыста тандемді масс-спектрометриялық талдаудың жылдамдығы мен сезгіштігін жоғарылату үшін жаңа «кірістірілген уақыт» режимінде екі уақыттық ұшу талдағыштардың тандемін қолдану ұсынылды. Ол бірінші «баяу» талдағышта бөлудің бір циклі аясында иондар үшін фрагментті спектрлерді параллель талдауға мүмкіндік береді. Әдісті іске асыру үшін жаңа типті «баяу» уақыт-ұшу талдағыш ұсынылған, ол планарды торсыз айналар арасындағы иондардың көп рет шағылуымен жүретін периодты линзалардағы төмен энергиялар

иондар шоқтарының көлденең ұстап тұруды қамтамасыз етеді. Сұлба ион траекториясының тиімді ұзындығын едәуір арттыруға мүмкіндік береді, сонымен бірге массалардың толық диапазонын талдау мүмкіндігін сақтайды және иондардың энергиясы бойынша уақыт-ұшу тоғыстаудың жоғары реттілігін қамтамасыз етеді. Талдағыштың прототипіндегі есептеулер мен эксперименттік зерттеулер оның жоғары өткізу қабілетін (шоқтың әрқайсысында көлденең бағытта кемінде  $6 \text{ мм} \times 1,50$ ), жақсы ажырату қабілетін (5000-нан астам) және кең (шаманың 6 реттілігін) динамикалық диапазонды анықтады.

[58] жұмыста 80 МГц қайталау жиілігімен жұмыс істейтін уақытша-ұшу электрондық энергия талдағышы ұсынылды. Талдағыш 3 эВ энергиялы электрондар үшін 40 мэВ энергия ажыратуға ие. Энергиялық ажыратудың шегі детектордың іске қосылу уақытына немесе уақыттық ажыратуға байланысты. Қазіргі уақытта 100 пс уақыттық ажыратуға ие детектор 200 МэВ электрондар үшін 1 мэВ-тен кем энергиялық ажыратуға ие. Ол уақытты-ұшу энергия талдағышының қайталауының жоғары жиілігін қамтамасыз етеді.

[59] жұмыста зарядталған бөлшектерді энергиялық талдауға арналған электрстатикалық спектрограф моделі құрастырылып жасалды. Аспап бес каскадты цилиндрлік айналы талдағышқа негізделген. Тестілеу нәтижелері спектрографтың бұрын есептелген электрондық-оптикалық сипаттамаларына сәйкес келеді. Орташа кинетикалық энергия аралығының 11,5% шегіндегі энергияға ие зарядталған бөлшектер 0,6% аспаптық ажыратуымен бір мезгілде анықталуы мүмкін.

[60] жұмыста біртекті өріске ие жазық магниттік айнаның оптималды жұмыс режимі табылды, онда екінші ретті тоғыстау есебінен аспаптың жарық күші артады. Сонымен қатар, жартылай дөңгелекті тоғыстауға ие белгілі масс-спектрометрден айырмашылығы көзі мен қабылдағыш өрістен тыс орналасқан. Спектрограф режимінде жұмыс істеу үшін детекторларды орналастыруға қажетті тоғыс сызығының координаталары анықталады.

[61] жұмыста конустық жүйелердегі екінші ретті тоғыстау шарттары сандық түрде зерттелген. Электронның салыстырмалы

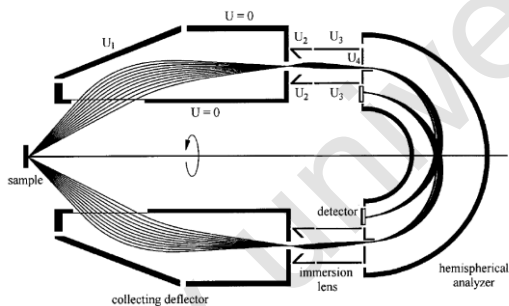
энергиясының функциясы ретінде сәйкесті шыңдарына ие жүйелер үшін екінші ретті бұрыштық тоғыстау қарастырылған. Ішкі конустың бұрыш жартысының әр түрлі мәндеріне сәйкесті тәуелділіктер ұсынылған. Параллельді жасаушыларға ие жүйелер үшін екінші ретті бұрыштық тоғыстау симметрия осіндегі нүктелік көзінің орнының конустың жарты бұрышына тәуелділігі ретінде ұсынылған. Соңғы өлшемді конустық жүйелерде екінші ретті тоғыстауға қол жеткізу мүмкіндігі талқыланды. Берілген аспаптар үшін электронды-оптикалық сұлбалар ұсынылған.

[62] жұмыс параметрлерінің өзгеруінің кең диапазонында қиық цилиндр типті энергия талдағышына негізделген электрстатикалық спектрографты есептеуге арналған. Бір реттілікке ерекшеленетін шоқтағы энергиялық шашырау кезінде тоғыстар сызығының орны анықталды. Энергия бойынша сызықтық және меншікті дисперсиялары анықталды. Екі жазық электродтардан құрылатын кең таралған спектрографымен салыстыру жүргізілді.

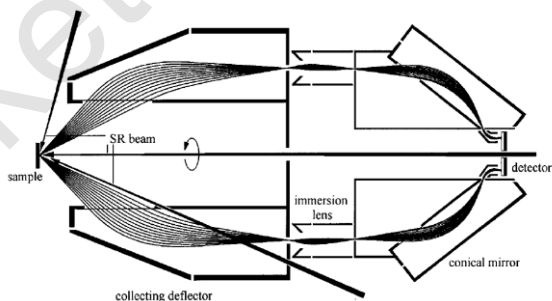
[63] мақалада электрстатикалық электронды талдағыштың жаңа сұлбасы ұсынылған, ол жоғары энергия ажыратуымен және субмикронды аймақтардан шыққан фотоэлектрондарды жинаудың жоғары тиімділігімен сипатталады. Талдағыш электронды жинау үшін төмен абберациялы электрстатикалық айнаны, сондай-ақ тежегіш қуыс цилиндрлік линзаларды және жартылай сфералы энергия талдағышын қолданады. Талдағыштың мүмкін болатын модификациялары талқыланды. Энергия талдағыштың жалпы сұлбасы 1.8-суретте көрсетілген. Бөлшектер шоғы дефлектордан цилиндрдің жасаушы беті бойымен шығып, конустық және цилиндрлік коаксиалды электродтардан тұратын қуыс линзаның төрт электродымен тежеледі, олардың арасында бойлық электрстатикалық өріс туғызылады. Бұл линза екі әрекетті орындайды. Біріншіден, бөлшектер шоғын жартылай сфералы талдағыштағы берілу энергиясы үлкен емес болатындай етіп баяулатады, оның энергиялық ажыратуы жоғары. Екіншіден, ол шоқтағы бұрыштық шашыратуды азайтады.

Өте жоғары энергиялық ажыратуды қажет етпейтін қолданыстарда негізгі жартылай сфералы дефлекторды 1.9-суретте көрсетілген қарапайым айналы талдағышпен ауыстыруға болады [63, 1654 б.].

Бөлшектерді тіркеудің көп арналы режимінде жұмыс істейтін талдағыштар өз қабілеттерімен қызығушылық тудырады, олар - тізбектей (уақыт бойынша) диспергирлеуге ие талдағышқа қарағанда әлдеқайда энергияны тиімді пайдаланады. Олар бірнеше спектрді бір уақытта өлшеу принципі бойынша жұмыс істейді, ал бұл өз кезекте экспрессті бір уақытта көп элементті талдау үшін пайдалануға мүмкіндік береді.



1.8-сурет. Қуыс коаксиалды цилиндрлік линзалар мен жартылай сфералы дефлектордан тұратын жоғары трансмиссиялы энергия талдағышының конфигурациясы



1.9-сурет. Қуыс коаксиалды цилиндрлік линзалар мен негізгі конустық айналы талдағышынан құрылатын жоғары трансмиссиялы энергия талдағышы

Энергия мен бұрыш бойынша көп арналы тіркейтін зарядталған бөлшектердің жаңа параллель талдағышы [64] мақалада сипатталған. Бұл екі айнымалыны бір уақытта көп арналы тіркеу екі өлшемді позиционды-сезгіш детекторды қолдануымен қол жеткізіледі. Аспап бұрыш бойынша ақпарат әрбір тіркелетін бөлшектің азимуталды координатадан, ал энергия радиалды координатасынан алынатындай етіп құрастырылған. Аспап Аллен мен оның әріптестері құрастырылған «Бессель қорабы» оригиналды сұлбасына негізделген. Жалпы теориялық принциптер қарастырылып, бағаланды, бұрыштық ажыратуымен ультракүлгін фотоэлектрондық фотоиондық сәйкестіктер эксперименттерінде қолдану үшін жасалған нақты құрылғының нәтижелері туралы айтылды.

[65] жұмыста екінші ретті электрондар үшін жаңа дисперсиялық көп арналы талдағышының конструкциясы, модельдеу және тестілеу нәтижелері көрсетілген. 50 мВ эксперименттік ажыратудың және спектрометрдің тұрақтысы арқасында бұл талдағыш интегралды схемалардағы кернеуді өлшеу үшін өте қолайлы. Талдағышты кескін режимінде екінші ретті және шағылған электрондарды толық бөлу үшін де қолдануға болады. 20 эВ ені бар электрондардың екінші спектрінің жолағын параллель тіркеуі алғашқы электрондардың  $<2$  кэВ төмен энергиялары кезінде материалдардың сипаттамалық мәліметтерін алу үшін қолданылуы мүмкін.

Электрондардың энергияларының шығын спектрінен әлсіз сипаттамалық сигналдарды өлшеуге арналған көп арналы цилиндрлік шағылдырушы электрондық энергия талдағышы [66] жұмыста сипатталған. Талдағыш идеал шектік өрісіне ие және оның энергия бойынша ажыратуы мен дисперсиясы энергия функциялары ретінде сипатталады, бұл функциялар идеал цилиндрлік электр өрістегі электрондардың қозғалысын сандық теңдеу арқылы шешіледі. Детектордағы электрондардың радиалды координатасының сандық нәтижелері кіру координатасының, бұрыш пен энергияның функциясы болып табылады, және де ол екінші ретті полиномдарға жуық деп алынады. Талдағыштың тіркеу тиімділігі бір арналы режимдегі

эквивалентті құрылғыға қарағанда 100-150 есе жақсы, бірақ үлкейтуші линзалар жүйесінің шектеулі энергия трансмиссиясы бұл факторды шамамен 2 есе азайтады.

[67] жұмыста зарядталған бөлшектерді энергиясы бойынша фильтрацияға ие электрстатикалық көп арналы дефлектор ұсынылады, ол бойлық осінде жіп тәрізді электрод орналасқан жабық кесіктерге ие цилиндрден құрылады. Мұндай жүйенің потенциалының таралуы аналитикалық түрде анықталды. Бөлшектер шоғын жерге тұйықталған кесіктері арқылы кіру және шығу кезінде жүйенің параметрлері есептелінген. Цилиндр шеңберінің ұзындығымен салыстырғанда азимут бағыттағы шоқтың кішкентай өлшеміне байланысты ұсынылған жүйе шоқты оны тіркеуші құрылғыға ауытқыту үшін 1-4 арналы динамикалық монополиялық масс-спектрометрмен жақсы үйлеседі.

[68] мақалада экспресс оже-талдауға арналған цилиндрлік симметриялы электрстатикалық өріс негізіндегі электронды энергия талдағышы ұсынылған. Аспап жобаланған және құрастырылған. Талдағыштың ең жақсы параметрлері бағаланып, эксперименттік түрде тексерілген.

Рентгендік фотоэлектрондық спектроскопия спектрлерін жылдам алуға арналған электронды энергия талдағышының жаңа типі [69] жұмыста ұсынылған. Аспап  $10^{-5}$  Торр қысым астында жұмыс істеуге арналған. Ұсынылған талдағышта қарапайым талдағыштың тежеуші торының жоғары трансмиссиясын сақтай отырып, жолақтық-өткізу қабілеттілігін сақтау үшін пост-монохроматормен біріктірілген сфералық тежеуші торлар пайдаланады. Модельдеудің мақсаты - тежегіш тор мен пост-монохроматор арасындағы өзара әрекеттесуді зерттеу болып табылады. Талдағыштың жұмысындағы негізгі факторлар тежегіш тордағы және шеткі электр өрістеріндегі электрондардың шашырауы болып табылады. Модельдеу нәтижелері бойынша алтын үлгілері мен жұқа полистирол қабықшаларын қолдана отырып, электронды энергия талдағышы сынақтан өткізілді.

Дефлектор типті электрстатикалық электронды энергия талдағының кіріс және шығыс жазықтықтарында физикалық шектегіштерді (мысалы, саңылаулар мен диафрагмалар) қолдану

көбінесе «идеал» эквипотенциалды таралуда қажетсіз көмескіленулерді туғызады және ауытқу бұрышын азайтады. [70] жұмыста «SIMION» электронды шоқтарының траекторияларын модельдеу бағдарламасын қолдана отырып, стандартты жартылай сфералы энергия талдағышындағы шашыраған өріске физикалық шектегіштер мен Иост пластиналарының әсері зерттелді. Иост плиталары мен физикалық шектеулерге байланысты шеттік өрісінің әсерін теңдестіру үшін бұрын Иостпен ұсынылған сұлбаның коррекциясы жалғастырылды. Бұл коррекция сұлбасының артықшылығы - конструкцияның қарапайымдылығында.

[71] жұмыста энергиялардың кең диапазонында бір уақытта талдайтын электронды энергия талдағышы ұсынылған. Онда электрондар жоғары өткізгіш саңылау арқылы салыстырмалы біркелкі магнит өрісіне еніп, бұрандалы траекториялар бойымен қозғалады. Содан кейін олар екінші саңылаудан өтіп, детекторда тоғысталады. Олардың энергиялары өрістегі азимут айналуымен байланысты, оны детектор тіркеуінен анықтауға болады. Мысал ретінде 20 есе ерекшеленетін энергиялар бастапқы энергиядан жуықпен 1% ажыратуымен бір уақытта талдауға болатындығы көрсетілген. Тағы бір мысал сұлбаның кіші өлшемді көздерден 500 эВ энергиялы электрондарды жинай алатындығын және оларды 0,6 эВ-қа дейін ажырата алатындығын көрсетті.

[72] жұмыста бұрыштық ажыратуға ие және жаңа құрастырылған линзалардың кіріс жүйесіне ие электронды энергия талдағышы құрастырылды. Бұл линзалар жүйесінде бұрыштық ажырату жазық дифракциялық саңылауды қолдану арқылы қол жеткізіледі. Бұл жүйені қолдана отырып, фотоэлектрондық дифракция үшін өлшеулерде жоғары бұрыштық ажырату және жоғары трансмиссия оңай жүзеге асырылады. Сонымен қатар, бұрыштық ажырату тегіс дифракциялық саңылаудың өлшемдерімен оңай анықталады.

[73] мақалада электрстатикалық талдағыш теориялық тұрғыдан зерттелген, оның электродтарының бірі көлбеу, ал екіншісі шоқтың осіне қатысты түзу болып келеді. Бұл талдағыш типі талдағыш шоқтағы зарядтың таралуын зерттеу кезінде

пайдаланылуы мүмкін, параллель пластиналардың қарапайым геометриясымен салыстырғанда оның ажыратуы артығырақ.

[74] жұмыста жоғары қарқынды электронды шоқтардың статикалық параметрлерін өлшеуге арналған әмбебап қондырғының жұмыс істеу принципі сипатталған. Бұл аспап таспалы және аксиалды-симметриялы шоқтардың металл нысанаға түсуі кезінде пайда болатын өтпелі сәулеленуді тіркеуге негізделген. Сәулеленуді тіркеу сұлбалары келтірілген, шоқтың конфигурациясына байланысты өлшеу әдістерінің ерекшеліктері сипатталған, электрондардың таспалы шоқтарының талдағыш конструкциясы алғаш рет ұсынылған. Құрылғының жұмыс істеу тиімділігі эксперимент және сандық есептеу нәтижелерімен дәлелденді.

Төмен энергиялы зарядталған бөлшектерді тіркеу үшін [75] жұмыстың авторлары сегментоидті деп аталатын электрстатикалық талдағыштың жаңа типін ұсынды. Оның пластиналары арасындағы өрістің кернеулігі анықталды және негізгі сипаттамалары қарастырылды (энергиялы - геометриялық коэффициент, энергия мен кіру бұрыштары бойынша өткізу қисықтары. Модульдің энергиялы-геометриялық коэффициентінің есептік мәні градуирлеу кезінде алынған эксперименттік мәнмен жақсы үйлеседі.

## **1.2 Корпускулалы-оптикалық жүйелерді есептеу әдістері**

Заманауи электронды спектрометрлердің сипаттамаларын жақсарту оларда қолданылатын корпускулалы-оптикалық жүйелердің шекті параметрлерімен шектеледі. Оларды жетілдіру қолда бар корпускулалы-оптикалық жүйелерді модернизациясы, корпускулалық оптиканың қосымша элементтерін қолдану; жақсартылған электрондық-оптикалық сипаттамаларға ие жаңа жүйелерді құрастыру және т.б. арқылы мүмкін болады.

Корпускулалы-оптикалық жүйелерді синтездеуде ең тиімді әдіс - корпускулалық оптиканың кері есептерін қою және шешуді жүзеге асыратын тәсіл болып есептеледі. Бұл тәсіл корпускулалы-оптикалық жүйелерді есептеудің аналитикалық немесе жартылай аналитикалық әдістерін, соның ішінде

элементтерді оптималды үйлестіру әдісін қолдануды қажет етеді. [76,77] жұмыстарда оптиканың кері мәселесі шешілген - зарядталған бөлшектер шоғының берілген электронды-оптикалық параметрлері бойынша шоқты құрушы өрістерді сипаттауға болады.

Заманауи эксперименттегі энергия талдаудың аспаптары мен құралдарына қоятын және үнемі жоғарылап келе жатқан талаптар есептеу әдістерінің құруын және әзірлеуін, параметрлердің зерттеуін және практикада қолдануға арналған корпускулалы-оптикалық жүйелердің жаңа кластарын ұсынуды ынталандырады.

В.В. Зашквараның басшылығымен орындалған бірқатар [78-80] жұмыстарда ауытқытушы өріске ие дефлекторлық типті талдағыштарды синтездеудің жаңа мәселесін шешу үшін электрстатикалық остік симметриялық мультипольдер қолданылды. Жақсартылған сипаттамаларға ие секторлы талдағыштардың жаңа сұлбалары ұсынылды. Ауытқытушы электродтардың пішіндері есептелген. Толқындық теңдеуді шешуге операторды бөлу әдісі [81-83] жұмыстарда қолданылды. Цилиндрлік координаталар жүйесінде дөңгелектік мультипольдердің құрылымына ие өрістердің эволюциясын сипаттайтын шешімдер алынды. [84] жұмыста лапласты емес дөңгелектік мультиполь құрылып, оның дефлекторлық типті электрстатикалық талдағыштың бұрыштық тоғысына түзетуші әсерінің негізгі мүмкіндігі қарастырылған. [85] жұмыста цилиндрлік координаталарда дөңгелектік мультипольдер негізінде Дирихленің сыртқы шеткі есебі шешілген. Бірнеше мультипольді-цилиндрлік өрістер есептелген. Цилиндрлік координаталар жүйесіндегі Дирихле мәселесін шешуге негізделген мультипольді-цилиндрлік өрістерді есептеу әдісі [86] жұмыста ұсынылған.

[87] жұмыста жүйенің өрісті туғызушы элементтерінің симметрия тобының келтірілмейтін көрсетілімдер бойынша потенциалды жіктеуін қолданатын әдіс ұсынылған.  $S_{IV}$  симметрия тобының жағдайы үшін жазық пластиналы электродтарына ие мультипольді жүйелер үшін шекаралық есеп шешілген. Мұндай жүйелердің өріс потенциалы үшін квадратуралық өрнек алынған. Мұндай шешім мүмкін болатын

электродтардың потенциалына қолданылатын шарттар анықталды. Кейбір нақты жүйелерде потенциалды бөлуді есептеу нәтижелері келтірілген.

[88, 89] жұмыстарда мультипольді-цилиндрлік өрісіне ие аксиалды-симметриялы айнадағы зарядталған бөлшектердің траекториясын есептеудің жуық-аналитикалық әдісі ұсынылған. Бұл әдіс-тәсіл жоғары ажыратуға ие айналық талдағыштарды құрастыру кезінде олардың электронды-оптикалық сипаттамаларын анықтауға мүмкіндік береді.

Элементар функциялармен сипатталатын сақиналы ерекшелікке ие осьтік симметриялық Лаплас потенциалдарының жаңа класы [90] жұмыста ұсынылды. Мұнда энергия талдау жүйелері және линзаларды синтездеу есептерінде бұл класты қолдану мүмкіндіктері талқыланды. Сақиналы ерекшеліктерге ие электр өрістерінің эквипотенциалдық суреттері келтірілген. [91] жұмыста симметрия жазықтығындағы тоғыстау мен дисперсияның берілген сипаттамаларына сәйкес екі өлшемді лаплас өрістерін қайта құрудың жалпы формулалары көрсетілген. Бөлшектер шоғының желдеткіш тәрізді идеал тоғысқа ие энергия талдағыштың электродтық конфигурациясы анықталды, жазық траекториялардың параметрлері, олардың пішіні, энергиялық дисперсиясы есептелген.

[92] жұмыста Донкиннің аналитикалық көрінісі негізінде конустық эквипотенциалдарына ие өріс құрылымдарының синтезі қарастырылған. Мұндай құрылымдардың иерархиясы анықталып, эквипотенциалды суреттердің мысалдары келтіріліп, симметриялы өрістер үшін Коши есебі шешілді. [93] жұмыста энергия талдағыш пен монохроматорларды құрылғыларында қолдану үшін перспективті кейбір жүйелердің электрондық-оптикалық сипаттамалары зерттелген.

[94] жұмыста электрондық (иондық) спектрограф идеясын тиімді іске асыруға болатын оптималды электрондық-оптикалық орталарды анықтауға жаңа әдіс-тәсіл ұсынылған. Эйлер біртектілігі шартына бағынатын Лаплас потенциалына ие электрстатикалық өрістер негіз болды. Мұндай өрістер негізіндегі спектрографтардың жұмыс принципі біртектілік шартында әр түрлі энергияларға ие бөлшек траекторияларының изоэнергиялық

жиынының ұқсастығының ерекше қасиетімен байланысты. Қажетті өрістерді құру үшін аналитикалық көрсетілімнің жаңа әдісі ұсынылды, оның негізі конус тәрізді өрістерге арналған Донкиннің кешенді көрініс аппараты болып табылады. Ұсынылған алгоритмдер біртекті потенциалдарды қарапайым түрде құруға мүмкіндік береді. Бұл негізде жалпы түрде симметрия жазықтығына ие біртекті потенциалдар үшін Коши есебі жабық аналитикалық түрде қойылады және шешілген. Бұл қатардың кейбір нақты құрылымдары келтірілген.

[95] жұмыста аксиалды симметриялық және планарлы лаплас потенциалдары арасындағы жаңа аналитикалық байланыстар қарастырылған, олардың негізінде симметрия осі бар аймақтарда остік симметриялық электр өрістер үшін Коши әдісін шешудің тиімді және ықшамды алгоритмдері құрылған. Алынған жуықтаудың дәлдігін бағалауы келтірілген. [96] жұмыста үшөлшемді лаплас потенциалдарының кең класын құрудың жаңа аналитикалық тәсілі дамыған. Бұл класстар, әсіресе, Лаплас теңдеуі үшін Кошидің дұрыс емес есебі туындаған кезде бөлшектер динамикасының кері есептері негізінде электронды-оптикалық құрылғыларды синтездеу есептерінде пайдалы. [97] мақалада мультипольді электрлік және магниттік өріс құрылымдарының жаңа кластары ұсынылған, олардың негізінде жаңа корпускулалы-оптикалық элементтердің тиімді синтезі мүмкін.

[98] мақалада апертура тіліктері бойынша бірөлшемді торға ие цилиндрлік айналы талдағыштың электр өрісін сипаттау үшін потенциалдың моделі ұсынылған. Торларға жақын шеткі өрістің зарядталған бөлшектердің траекторияларына әсері зерттелген. Трансмиссия және бұрыштық абerrация үшін формулалар алынды.

[99] жұмыста цилиндрлік талдағыштың негізгі параметрлері үшін аналитикалық өрнектер алынған. Бұл талдағыштың екі ұшынан ішкі цилиндрдің потенциалымен бірдей жазық электродтар орнатылған. Талдағыштан тыс аймақта объект үшін бұрыш бойынша бірінші ретті тоғыстаудың бір және екі периодты режимдері есептелген. Объектінің талдағыштан арақашықтығы неғұрлым көп болса, соғұрлым оның жарық күші аз

болады. Үлгінің бетін жұқа бірінші ретті сәулеленумен сканерлеу кезінде, талдағыш шығысындағы шоқтың қарқындылығы есептелген. Объект центрінен алыстаған сайын қарқындылықтың төмендеуіне арналған эмпирикалық формулалар анықталды. Зарядталған бөлшектердің екі өлшемді оптикасы үшін бағдарламаның көмегімен және аналитикалық формулалар бойынша жүргізілген есептеулердің салыстыруы олардың айырмашылығы 10% - дан аспайтынын көрсетті.

[100] жұмыста көлденең дисперсиялы жүйелерден өткен кезде энергия-бұрыштың корреляциясына ие зарядталған бөлшектердің шоғы үшін тоғыстау шарттары мен тоғыс сызығының көлбеу бұрышы есептелген. Электрстатикалық және магниттік энергия талдағыштар қатарында кескіннің орналасуына арналған формулалар келтірілген. Цилиндрлік дефлектордың параметрлері егжей-тегжейлі есептелген. [101] жұмыста көз бен детектор жазық конденсатордың төменгі пластинасында орналасқан кезде энергия-бұрыштық корреляциясына ие шоқтардың тоғыстау шарты анықталды. Екінші ретті сфералық абберация мен дисперсия үшін өрнектер келтірілген.

[102] жұмыста кейбір өзекті электронды-оптикалық мәселелерді шешуге ерекше, бірақ өте тиімді тәсіл ұсынылған. Атап айтқанда, электрстатикалық құрылғылардың ұсынылған класы қоскаскадты электронды спектрометрлер жүйелеріндегі геометриялық абберацияларды түзетуге жарамды. Мұндай құрылғылар заманауи технологиялар әдістерімен техникалық тұрғыдан оңай жүзеге асырылады.

[103] мақала авторлармен «квизиконикалық» деп аталған электронды және иондық ағындардың электрстатикалық энергия талдағышының жаңа класының эволюциясының негізгі аспектілеріне арналған. Негізгі физикалық және математикалық идеялардың генезисі қарастырылған, мұндай жүйелерді есептеудің нақты математикалық теориясы құрылған, нақты конструкциялар сипатталған, эксперименттердің нәтижелері келтіріліп, бұл бағыттың даму перспективалары талқыланды.

[104] жұмыста монохроматор мен энергия талдағыштардың электронды-оптикалық жүйелері үшін екінші ретті абберацияны тасымалдау матрицалары ұсынылған. Бұл екі құрылғыда екі

магнитті дөңгелектік линзалар және тежегіш сүзгіш бар. Сүзгіш баяулатқыш линзадан, Вин сүзгішінен және үдеткіш линзадан құрылады. Дөңгелек линзалардың оптималды қозуы электрондардың үдеткіш линзадан параллель шығуын қамтамасыз етеді. Вин сүзгішіндегі қозу шоқтың саңылауларға тоғысталуын реттейді. Есептеу нәтижелері оптималды жұмыс істеу шарттарын анықтауға және жоғары ажыратуға ие энергияны шығынды электронды спектрометрдің эксперименттік нәтижелерін түсіндіруге пайдалы.

[105] жұмыста ұсынылған сфералық  $180^\circ$  және цилиндрлік  $127^\circ$  дефлекторларға негізделген жоғары ажыратуға ие электрондардың энергия шығыны спектрометрін оптимизациялаудың жаңа геометриялық өлшемі анықталған. Бұл өлшем электродтардың салыстырмалы геометриялық конфигурациясымен байланысты. Сфералық және цилиндрлік өрістер үшін электрондардың траекториясын есептеу тандем конфигурациясының бар екенін көрсетті, онда электрондар талдағышының шығысындағы орны мен энергияға жақсы сәйкес келеді. Әдеттегі тандем конфигурациясы дефлекторлардың оптикалық аберрациясына байланысты нашар анықталған кескін береді. Егер әдеттегі конфигурацияның модификациясын қолдану арқылы мұндай ауытқуларды түзетуге болады. Жаңа геометрияға екі талдағыш және онохроматорды сәуленің осіне қатысты  $90^\circ$ -ге немесе монохроматордың әдеттегі конфигурациядан  $180^\circ$ -қа айналуына қарапайым айналдыру арқылы қол жеткізуге болады.

[106] мақалада орташа жазықтығына ие екі өлшемді электрстатикалық өрістегі зарядталған бөлшектер шоқтарының уақыт-ұшу тоғыстау қасиеттері зерттелген. Бөлшектердің ұшу-уақытының жіктеу коэффициенттерін және оның координаттарын кіші параметрлер бойынша қатарға жіктеудің қарапайым аналитикалық қатынастары алынды. Уақыттық-ұшу аберрациялардың әр түрлі түрлерін жою шарттары табылды.

[107] жұмыста күрделі үшөлшемді электронды-оптикалық жүйелердің жеке элементтерінің электрстатикалық өрісін сандық талдау есебі қарастырылған.

[108] жұмыста аберрациялық интегралдарды есептеу негізінде зарядталған бөлшектердің полярлы-тороидальды

талдағыштардың кеңістіктік және уақытты-ұшу қасиеттерін зерттеу әдісі ұсынылған. Әдістің тиімділігі сандық модельдеу нәтижелерін және эксперименттік өлшеу нәтижелерімен салыстыру арқылы суреттелген.

[109] жұмыста квадрупольді массалық сүзгіштің электродтарының оптималды орынға қатысты берілген ығысулары кезінде өрістің кеңістіктік гармоникаларының амплитудалары есептелді. Электродтардың радиалды және бұрыштық ығысу жағдайлары, электродтардың қоректену асимметриясы, сондай-ақ өзекшелер диаметрінің сәйкес еместігі қарастырылған. Алынған мәліметтер массаның шыңының нақты пішінін есептеу үшін қажет және масса сүзгішін жобалау кезінде пайдалы болады.

[110] мақалада екі коаксиалды цилиндр және сақиналы саңылауына ие кесіктік диафрагма түріндегі электрстатикалық жүйе үшін объектінің (қуыс шоқтың) орналасуына байланысты кескінің орнын есептеуі келтірілген.

[111] жұмыста біртекті емес магнит өрісіне ие масса бойынша зарядталған бөлшектердің статикалық талдағышы ұсынылған. Аналитикалық түрде магниттік потенциалдың таралуы үшін өрнек алынды, оның негізінде бірінші ретті бұрыштық тоғыстау жағдайы үшін дисперсия жазықтығындағы негізгі параметрлердің формулалары табылды. Сондай-ақ, көз мен қабылдағышты магнит өрісінен тыс аймақта орналастыру кезінде кеңістіктік тоғыстау шарттары алынды.

[112] жұмыста қарапайым құрылымды энергия талдағышының электрстатикалық потенциалының аналитикалық түрде таралуы және негізгі параметрлері алынған. Өріс құрушы электродтың бұрыштық өлшемдерінің кең диапазонында максималды мүмкін дисперсиялы жұмыс режимдері табылды.

[113] жұмыста жартылай сфералы энергия талдағыштарының шығыс және кіріс жазықтықтарында «Герцог аймақтарындағы» регулярлы емес, сфералық емес шекараларды қарастыру үшін сфералық координаталарда электронның қозғалыс ережелері қолданылды. Кейбір классикалық сұлбаларды жақсарту үшін салыстырулар және тексеру жүргізілген, яғни «идеал өріс» жуықтаудың кенеттен қысқаруы,  $180^0$

жазықтықтағы нақты саңылаулар, Герцогтың түзетуі, Иост түзетуі және қысқартылған сфералар. Тоғыстау, траекторияның максималды ені, негізгі ажырату және дөңгелектік жол үшін банан тәрізді асимметрия зерттелді. Конструкцияның теңдеулері ұсынылған.

[114] жұмыста жоғары ажыратуға ие жартылай сфералы энергия талдағыштан өтетін электрондардың өту уақытының таралуы анықталды. Өлшеу нәтижелерінің аналитикалық өрнектермен салыстыруы бірдей кинетикалық энергияға ие электрондар арасындағы әр түрлі өту уақыты электрондардың жарты шарлардың айналасында қозғалатын Кеплер орбитасында артатындығын көрсетеді. Өлшеулерді жеңілдету үшін спектрометр ішіндегі бір оқиғаны тіркеуге қабілетті позиционды-сезгіш электрондық детектор орнатылған. Бұл аспап анодтың кідіріс сызықтарына негізделген.

Дисперсиялық талдағыштағы зарядталған бөлшектердің қозғалысын талдау негізінде [115] жұмыста талдағыштың шығысындағы дабылды және зарядталған бөлшектердің энергиясының таралу функциясын байланыстыратын теңдеулер алынып, шешілген. Стандартты процедурамен салыстырғанда энергиялық таралуды қалпына келтіруге түзетулердің әсері қарастырылды.

Электрстатикалық дисперсиялық талдағыштың шығысындағы дабылды ауытқытушы электродтардағы потенциалдардың ауытқуын ескеру кезіндегі өріске кіретін зарядталған бөлшектердің энергиясы бойынша таралу функциясын байланыстыратын теңдеу [116] жұмыста алынды. Бұл теңдеудің шешімдері алынды. Шудың талдағыштың аппараттық функцияларына әсері қарастырылды.

[117] жұмыс электронды шоқтардың кіріс параметрлерінің цилиндрлік энергия талдағыштың аппараттық функциясының пішініне әсерін зерттеуге арналған. Энергия талдағышына электронды шоқтың кіру бұрыштарын таңдау арқылы шындар «құйрықтарын» едәуір төмендеу мүмкіндігі көрсетілген.

[118] жұмыста шекаралық интегралдық теңдеулер әдісіне қолданылып Лапластың аксиалды теңдеуін шешудегі осьтің мәселесін шешу алгоритмі келтірілген, онда коллокация әдісі мен

аналитикалық алмастыру әдісі және одан кейінгі аналитикалық интеграция арқылы интегралдық теңдеу матрицалық теңдеуге түрлендірілді. Төртінші реттілікке дейін потенциалды және оның туындыларын есептеу алгоритмі жасалды.

[119] мақалада аксиалды электрстатикалық энергия талдағыштарының аппараттық функциясын есептеу алгоритмі ұсынылған. Бұл алгоритм қозғалыс теңдеулерін сандық шешуге және осы есептеулердің нәтижелерін өңдеуге негізделген.

[120] жұмыста ұйытқу теориясы негізінде зарядталған бөлшектердің есептеуіш оптикасының бірқатар маңызды мәселелерін шешу қарастырылған. Олардың ішінде электродтар немесе магниттік полюстер пішінінің айналмалы немесе планарлық симметриядан, соның ішінде шекті эффекттерден аз ауытқуынан туындаған электрлік және магниттік өрістердің ұйытқуларын есептеу. Жалпы тензор түрінде зарядталған бөлшектердің шоқтарының аберрациялық талдауы қарастырылған. Тау-вариация әдісі және бастапқы параметрлерді түрлендірудің жалпыланған әдісі сияқты басқа сандық тәсілдермен үйлестіргенде ұйытқу теориясының әдістері кулонның итерілуі мен бөлшектердің торға шашырауын модельдеу есептерінде тиімді екендігі көрсетілген.

[121] жұмыста конустық жүйелердегі екінші ретті тоғыстау шарттары сандық зерттелген. Электронның салыстырмалы энергиясының функциясы ретінде сәйкесті шындалған ие жүйелер үшін екінші ретті бұрыштық тоғыстау қарастырылған. Ішкі конустың жарты бұрышының әр түрлі мәндеріне сәйкес тәуелділіктер ұсынылған. Екінші ретті бұрыштық тоғыстау параллельді жасаушыларына ие жүйелер үшін симметрия осіндегі нүктелік көзінің конус бұрышының жартысына тәуелділігі ретінде ұсынылған. Берілген аспаптар үшін электронды-оптикалық сұлбалар берілген.

[122] жұмыста электронды-оптикалық жүйелердің маңызды параметрлерінің бірі - бұрыштық тоғыстау реттілігін бағалаудың сандық әдісі ұсынылған. Бұл әдіс дәрежелі функциясының өзара корреляциясының шамасын анықтауға және зарядталған бөлшектердің кіру бұрышының траекториялық талдау барысында

пайда болған функцияға негізделген. Аналитикалық шешімдерді беретін жүйелерге әдіс тексерілді.

[123,124] мақалаларда электронды және ионды-оптикалық жүйелерді сандық модельдеу әдістемесі келтірілген; шекаралық элементтер әдісімен потенциалдың таралу функциясын есептеудің жоғары дәлдігін қамтамасыз ету алгоритмдері мен әдістері ұсынылған; жоғары ретті бұрыштық және кеңістіктік тоғыстау жағдайларын анықтау әдісі жасалды. Бұл әдістер негізінде корпускулалық оптика жүйелерін траекториялық талдау үшін бағдарламалық қамтамасыз ету құрылған, есептеу қателіктері бойынша зерттеулер және модельдік сұлбаларда егжей-тегжейлі тестілеу жүргізілген.

[125] жұмыста Дирихленің жазық сыртқы есебін шешудің математикалық аппараты дамыған және шекаралық интегралдарды, соның ішінде сингулярлық ядроларды есептеу формулалары алынған. Ұсынылған аппарат негізінде электронды-оптикалық жүйелерді модельдеуге арналған бағдарламалық қамтамасыз ету әзірленіп, есептеу қателіктері бойынша зерттеулер және модельдік сұлбаларда тестілеу жүргізілген.

Электронды-оптикалық жүйелердің маңызды параметрлерінің бірі - кеңістіктік тоғыстау реттілігін бағалаудың сандық әдісі [126] жұмыста ұсынылған. Бұл әдіс дәрежелі функцияның өзара корреляциясының шамасын анықтауға және траекториялық талдау барысында қалыптасқан зарядталған бөлшектің бастапқы координатасының кейбір функциясын анықтауға негізделген. Әдіс аналитикалық шешімдерді беретін жүйелерде тексерілді.

Секторлық дефлектордың шеткі өрістердегі дисперсия жазықтығындағы зарядталған бөлшектер шоғының қайта тоғыстауын жою тәсілі [127] жұмыста ұсынылған. Бұл әдіс дефлектордың шеткі облысының геометриясын модификациялау арқылы оптикалық осьте ауытқытушы электрстатикалық өрістің кернеулігінің монотонды емес таралуына негізделген.

[128] мақала жарық күші мен ажыратуы бойынша рекордтық параметрлерге ие электрстатикалық энергия талдағыштарының теориялық синтезі мен практикалық іске асырылуының одан әрі дамуына арналған. Оптималды шешімдерді іздеу ең заманауи

бағдарламалық пакеттерді, атап айтқанда «SIMION» қолданатын компьютерлік стратегияға негізделген. Берілген жағдайда квазиконикалық жүйелердің деформациясы туралы сөз қозғалып, бұл құрылымның тиімділігін жақсарту және энергияны талдау сипаттамаларын жақсарту қарастырылған.

[129] жұмыста зарядталған бөлшектердің траекторияларының осьтік траекториядан ауытқуын анықтайтын дәл дифференциалдық теңдеулер алынған. Бұл теңдеулер қисықсыздықты координаталарда жазылған, олар зарядталған бөлшектер шоғының динамикасын сандық есептеулер үшін қолайлы.

[130] мақалада жартылай сфералы дефлекторлық талдағыштың шашыраған өрісін оптимизациялау үшін сандық модельдеу нәтижелері келтірілген, жұмыста шекаралық элементтер әдісі және ақырлы айырымдар сияқты сандық әдістер қолданылған.

Кеңістіктік зарядты ескере отырып, электронды шоктардағы бөлшектердің траекториясын есептеу үшін ақырлы элементтер әдісін қолдану ерекшеліктері [131] жұмыста қарастырылған. Регулярлы емес ақырлы элементтер торында пайда болатын физикалық емес әсерлер форма функциясын қолдана отырып, электр өрісінің кернеулігін есептеумен байланысты, оларды жою жолдары ұсынылған.

[132] жұмыста  $\Omega=i(x+iy)^n$  түріндегі кешенді потенциалға ие екі өлшемді электр өрістерінің электронды-оптикалық сипаттамалары зерттелді, мұндағы  $n$ -нақты сан. Электронды ағындардың тиімді спектрографын құру үшін симметрия жазықтығында және оның айналасында бөлшектердің динамикасын зерттеу жүргізілген.

[133] жұмыста анық емес электродты цилиндрлік жүйеде берілген пішінге ие электрстатикалық өрістерді алу әдісі қарастырылған. Электродтардың «таралуы» кері шекаралық есепті шешуге мүмкіндік береді - қажетті өрісті алу үшін цилиндрдің периметрі бойынша электрлік потенциалдың азимут таралуын беруге мүмкіндік бар.

## 2 БІРТЕКТІ ЕМЕС ЭЛЕКТРСТАТИКАЛЫҚ ӨРІС НЕГІЗІНДЕ ЗАРЯДТАЛҒАН БӨЛШЕКТЕРДІҢ ЭНЕРГИЯ ТАЛДАҒЫШЫН МОДЕЛЬДЕУ

Зарядталған бөлшектердің энергиялық спектрі әр түрлі физикалық процестер және заттың құрылымы туралы кең ақпаратпен байланысты электрондардың энергиялық спектроскопиясының үлкен мүмкіндіктері белгілі талдау әдістерін одан әрі жетілдіруге және электронды спектроскопияның жаңа бағыттарын дамытуға ықпал етеді.

Электрондық оптика дамуының алғашқы кезеңінде негізгі зерттеулер зарядталған бөлшектер шоқтарының стигматикалық тоғыстаудың қасиеттері ие болатын осьтік симметриялы өрістерді зерттеуге және дұрыс масштабты көміскеленбеген кескінді қалыптастыруға бағытталған. Аз және орташа энергиялы электрондар ағындарын зерттеулерде ең озық және кеңінен қолданылатын аспаптар цилиндрлік, сфералық, гиперболалық өрістерге негізделген электрстатикалық айналы энергия талдағыштары болып табылады. Классикалық типті белгілі өрістердің ішінде конструкциясы қарапайым және кеңінен қолданатын зарядталған бөлшектердің шоқтарының энергия талдағышы - бұл біртекті өріс негізіндегі электрстатикалық айна болып есептеледі.

Есептеуіш техника құралдарының өндіруінің қарқынды өсуі болашақта эксперименттік құрылғыларды синтездеу есептерін, соның ішінде аналитикалық есептерді бірінші жоспарға жылжытады, ал мұнда әмбебаптық және бағалау дәлдігіне ие болатын сандық әдістер негізгі рөл атқарады.

Ионды- және электронды-оптикалық жүйелерді сандық модельдеу үш өзіндік бөлімнен құрылады:

- жұмыс көлемінде электрстатикалық өрісті есептеу;
- жүйе өрісінде зарядталған бөлшектер траекторияларын есептеу;
- электронды-оптикалық жүйенің интегралдық сипаттамаларын есептеу: анықталған реттілікке ие болатын бұрыштық тоғыстау, дисперсия, ажырату қабілеттілігі, абберациялық көмескілер және т.б.

Қатты дененің бетін зерттеудің тиімді әдістерін әзірлеудегі одан әрі ілгерілеу қолданыстағы талдаушы жүйелерінің модернизациялауды немесе теорияның одан әрі дамуы негізінде сапалы жана талдау жүйелерін құруын қажет етеді. Сапалы жана әдістерге мультипольдер мен цилиндрлік өрістің синтездеу негізінде жоғары ажыратуға ие электронды талдағыштарды құрастыруды жатқызуға болады [134-143]. Алынған нәтижелердің әмбебаптылығын дәлелдеу үшін классикалық электрстатикалық өрістердің басқа түрлерімен мультипольдердің синтезі негізінде құрылған аналитикалық жүйелерді зерттеуді жалғастыру қажет. Потенциалды өрістердің мұндай класына біртекті өрісі пен дипольдің суперпозициясы болып табылатын гиперболалық заң бойынша кемитін электрстатикалық өріс жатады.

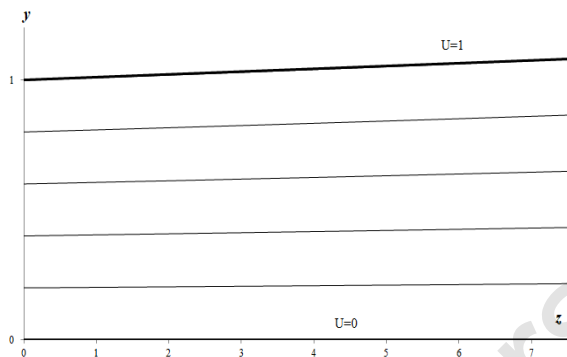
## 2.1 Электрстатикалық біртекті емес өрістің электронды-оптикалық қасиеттерін есептеу және талдау

Зерттеу объектісі ретінде айналық шағылу режимінде әрекет ететін электрстатикалық біртекті емес, гиперболалық заң бойынша кемитін өріс таңдалды, өріс потенциалы келесі өрнекпен сипатталады:

$$U = \frac{U_0}{d} y(1 - Az) \quad (2.1)$$

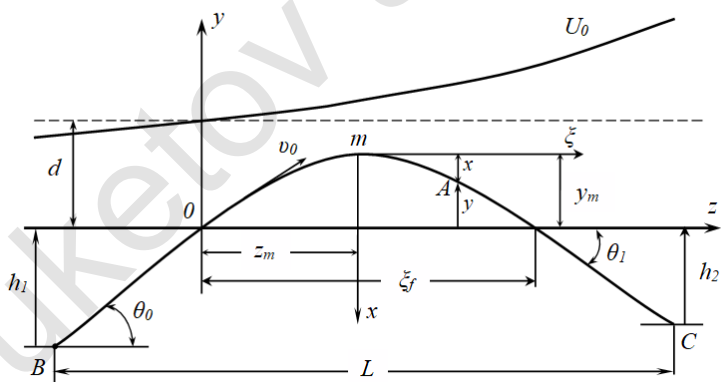
мұндағы  $A$  - өлшемсіз параметр,  $A=0$  кезінде- (2.1) өрісі біртекті болып табылады.

Сыртқы ауытқытушы электродтың пішіні біртекті емес өрістің эквипотенциалдық сызықтардың есептеулерінен анықталды. 2.1-суретте  $A = 0,01$  жағдай үшін электрстатикалық біртекті емес өрістің эквипотенциалдық сызықтардың суреті ұсынылған.



2.1-сурет. 1.  $A= 0,01$  жағдай үшін біртекті емес өрістің эквипотенциалдық сызықтары

(2.1) типті өріс екі электрод арасындағы кеңістікте қалыптасады, олардың біреуі жазық және Жер потенциалының астында, ал екіншісі  $U_0$  потенциалына ие гиперболалық пішінді электрод (2.2-сурет).



B - зарядталған бөлшектердің көзі, C – көздің ионды-оптикалық кескіні

2.2-сурет. Біртекті өріске негізделген электрстатикалық айна.  
(Үзік сызығы – жазық айна жағдайындағы жазық электрод)

Айналық шағылу режимінде зарядталған бөлшектер шоғы (2.1) өріске  $z$  осіне  $\theta_0$  бұрышпен кіреді, электрстатикалық өріс облысында  $m$  төбеге ие «қайтымды» траектория бойымен қозғалады және төменгі электродқа  $\theta_1$  бұрышпен оралады. Зарядталған бөлшектердің қайтымды траекториясы траекториясының  $m$  төбесіне қатысты асимметриялы болатын оң және сол жақ тармақтардан құрылады, сондықтан оның әр тармағын жеке есептеп, оларды кейін тігіп қосу қажет. Траекторияның оң және сол тармақтарын қосып тігудің шарты бөлшектердің траекториясын сипаттайтын функциялардың теңдігі және екі тармақ үшін  $m$  нүктесінде олардың туындылары бір-біріне тең болуы болып табылады. Қайтымды траекторияның тармақтарын есептеу үшін  $x, \xi$  жаңа координаттар жүйесіне көшеміз, оның басы  $m$  траекториясының төбесінде орналасады.

2.2-суретке сәйкес

$$z = z_m \pm \xi, \quad x = y_m - y. \quad (2.2)$$

Мұндағы  $\xi$  -нің алдындағы жоғары белгі траекторияның оң тармаққа ( $\xi > 0$ ), ал төменгі белгі – сол тармағына ( $\xi < 0$ ) сәйкес келеді.  $x, \xi$  координаталарындағы өрістің (2.1) таралуы келесі түрге ие болады:

$$U(x, \xi) = \omega(1 \pm A'\xi)(y_m - x), \quad (2.3)$$

мұндағы

$$\omega = \frac{U_0(1 - Az_m)}{d}, \quad A' = \frac{A}{1 - Az_m}. \quad (2.4)$$

Электрстатикалық потенциалдық өрістің ішінде қозғалыс кезіндегі энергияның сақталу заңына сәйкес зарядталған бөлшектің кинетикалық энергиясы потенциалдар айырымен анықталады. (2.3) өрісте  $m$  нүктесінен кез келген  $A$  нүктесіне дейін қозғалатын бөлшек үшін келесідей жазуға болады:

$$\frac{m}{2} \left( \dot{x}^2 + \dot{\xi}^2 \right) - \frac{m v_m^2}{2} = -q(U_m - U) = q\omega G_{1,2}(x, \xi), \quad (2.5)$$

мұндағы

$$G_{1,2}(x, \xi) = x \pm A' \xi (y_m - x). \quad (2.6)$$

Мұнда және одан әрі қарай төменгі индекстегі 1 саны оң жақ тармақтың функцияларына, ал 2 саны траекторияның сол жақ тармағының функцияларына сәйкес келеді.

$v_m^2 = \dot{\xi}_m^2$  шартты ескере отырып, (2.3)-өрістегі зарядталған бөлшектің қозғалысының бойлық құраушысы үшін энергияның сақталу заңын келесі түрде жазуға болады:

$$\frac{m \dot{\xi}^2}{2} - \frac{m v_m^2}{2} = -q \int_0^x \frac{\partial U(x, \xi)}{\partial \xi} \xi' d\xi = m q \omega A' \int_0^x (y_m - x) \xi' d\xi, \quad (2.7)$$

себебі  $\dot{x}_m = 0$  және  $\frac{d\xi}{dt} = \frac{d\xi}{dx} \frac{dx}{dt} = \xi' \dot{x}$ . Мұндағы  $\xi'$  туындысы екі тармақ үшін нөлден артық, себебі  $x$  пен  $\xi$  абсолют шамасы бойынша алынды.

$$x = y_m \text{ кезінде } \frac{m \dot{\xi}^2}{2} = \frac{m v_0^2}{2} \cos^2 \theta_{0,1} = W \cos^2 \theta_{0,1}, \quad \text{сондықтан}$$

(2.7)-өрнекті  $\frac{m v_m^2}{2}$  -ге қатысты келесі түрде жазуға болады:

$$\frac{m v_m^2}{2} = q\omega \left( S' \cos^2 \theta_{0,1} \pm A' f_{m,2} \right), \quad (2.8)$$

мұндағы

$$S' = \frac{S}{1 - A z_m}, \quad S = \frac{Wd}{qU_0}, \quad f_{m,2} = \int_0^{y_m} (y_m - x) \xi' dx \quad (2.9)$$

S шамасы ұзындық өлшеміне ие және электрондық айнаның кейбір сипатты өлшемі болып табылады. (2.5), (2.7) және (2.8) теңдеулерді  $\xi'$  -ге қатысты шеше отырып, (2.3) біртекті емес өрістегі зарядталған бөлшектің траекториясының интегралды-дифференциалдық теңдеуіне келеміз:

$$\begin{aligned} & \left( \xi'_{1,2} \right)^2 \left[ G_{1,2}(x, \xi) \pm A' \int_0^x (y_m - x) \xi'_{1,2} dx \right] = \\ & = S' \cos^2 \theta_{0,1} \pm A' f_{m,1,2} m A' \int_0^x (y_m - x) \xi'_{1,2} dx \end{aligned} \quad (2.10)$$

(2.10) интегро-дифференциалдық теңдік  $x=0$  нүктесінде ерекше нүктеге ие, себебі бұл жағдайда бөлшектің бөлімі нөлге айналады, сондықтан теңдеудің шешімі жалпыланған дәрежелі қатар түрінде ізделінеді [144]:

$$\xi = \sqrt{x} \sum_{n=0}^{\infty} c_n x^n + \sum_{n=1}^{\infty} a_n x^n, \quad (2.11)$$

Төменде В нүктелік көзінен оның С кескініне дейінгі бөлшектердің траекториясының z осіне толық проекциясын есептеудің соңғы нәтижелері келтірілген. Берілген теңдеулер ұзындық өлшеміне ие S параметрінің бірліктерімен алынған. 2.2-суретке сәйкес траекторияның көзден оның кескініне дейінгі толық проекциясы келесі қосынды болып табылады:

$$\begin{aligned} l = \frac{L}{S} &= \frac{1}{S} (H_1 \operatorname{ctg} \theta_o + H_2 \operatorname{ctg} \theta_1 + \xi_f) = \\ &= (h_1 \operatorname{ctg} \theta_o + h_2 \operatorname{ctg} \theta_1 + \xi_f) \end{aligned} \quad (2.12)$$

мұндағы

$$\frac{\xi_f}{S} = 2 \sin 2\theta_o + SA \left( \frac{4}{3} \sin^2 2\theta_o + \frac{8}{3} \sin^4 \theta_o \right) + (SA)^2 \left( \frac{16}{9} \sin^3 2\theta_o + \frac{16}{3} \sin^4 \theta_o \sin 2\theta_o \right), \quad (2.13)$$

және траекторияның өрістен шығу нүктесіндегі өске қарай көлбеу бұрышы

$$\operatorname{ctg} \theta_1 = \operatorname{ctg} \theta_0 + \frac{4}{3} (SA) + \frac{8}{3} (SA)^2 \sin 2\theta_0. \quad (2.14)$$

Осы тік жазықтықтағы зарядталған бөлшектер шоғының шашырату бұрышын және шоқтағы энергияның шашырауының салыстырмалы аз шамасын аз ұйытқулар ретінде қарастыра отырып,  $L$ -ды Тейлор қатарына жіктеуге болады [145]:

$$L = L_o + \frac{\partial L}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial L}{\partial \varepsilon} \Delta \varepsilon + \frac{1}{2!} \left( \frac{\partial^2 L}{\partial \theta^2} (\Delta \theta)^2 + \frac{\partial^2 L}{\partial \varepsilon^2} (\Delta \varepsilon)^2 + \frac{\partial^2 L}{\partial \theta \partial \varepsilon} \Delta \theta \Delta \varepsilon \right) + \dots \quad (2.15)$$

Екінші ретті бұрыштық тоғыстау режимі  $\frac{dL}{d\theta} = \frac{d^2L}{d\theta^2} = 0$

шартынан анықталады:

$$\cos^2 \theta_o - 3 \sin^2 \theta_o + (SA) \sin 4\theta_o + \frac{4}{3} (SA)^2 \left[ \frac{H_2}{S} (\cos^2 \theta_o - 3 \sin^2 \theta_o) + \sin^2 \theta_o (16 \cos^2 \theta_o - 10 \sin^2 \theta_o) \right] = 0 \quad (2.16)$$

(2.16) теңдеуді талдаудан екінші ретті бұрыштық тоғыстау режимі -  $A=0$ ,  $h_1 + h_2 = 0,5$  параметрлеріне ие талдағыш сұлбасы

үшін ғана жүзеге асыруға болатындығы (яғни жазық айна үшін). Бұл жағдайда екінші ретті тоғыстау режимінде жұмыс істейтін жазық айнамен салыстырғанда біртекті өріс негізіндегі модификацияланған талдағыштың ажыратуын жақсартуға бола ма? деген сұрақ туады.

Гиперболалық заң бойынша кемитін біртекті емес өріске ие талдағыштың ең тиімді нұсқасының параметрлерін іздеу үшін  $SA$ -ның әр түрлі мәндері және талданатын шоктың шашыратудың таңдалған  $\Delta\theta$  бұрышы үшін (2.12) формула бойынша гаусс тоғысының маңында кескіннің бойлық абerrациялық көмескілігін сипаттайтын  $f(\Delta\theta, SA, h_1/h_2) = l(\theta) - l(\theta_0)$  функцияларды анықтау қажет.

Біртекті емес өріске ие электронды-оптикалық айнарлардың абerrациялық көмескілеу функциялары есептелді (2.1-кесте), олардың сұлбалары  $SA$ -ның әр түрлі мәндеріне сәйкес келеді және жазық айнаның екінші ретті бұрыштық тоғыстау режиміне бапталған:  $h_1 + h_2 = 0,5$ ,  $\theta_0 = 30^\circ$ .

2.1-кесте. Біртекті емес өріс негізіндегі электронды-оптикалық айнарлардың абerrациялық көмескілену функциялары

$SA$	$\theta_1$ (град.)	$l_\theta$	$f(\Delta\theta, SA, h_1/h_2)$
0.000	30	2.5981	0.0268
0.005	29.9043	2.6056	0.0154
0.010	29.8082	2.6133	0.0117
0.015	29.7118	2.6210	0.0079
0.020	29.6149	2.6289	0.0063
0.025	29.5178	2.6368	0.0074
0.030	29.4202	2.6449	0.0097
0.035	29.3224	2.6530	0.0125
0.040	29.2242	2.6613	0.0157
0.045	29.1257	2.6697	0.0188
0.050	29.0269	2.6781	0.0220

Талдағышқа кірістегі бөлшектердің бұрыштық  $\Delta\theta = \pm 6^\circ$  шашырауы үшін жүргізілген траекторияларды есептеу нәтижелерінен біртекті өріске ие талдағыштың ең оптималды нұсқасының сұлбасы анықталды:  $h_1 + h_2 = 0,5$ ,  $\theta_0 = 30^\circ$  және  $SA = 0,02$ , бұл жағдайда абберациялық көмескілеу шамасы  $f(\Delta\theta, SA, h_1/h_2)$  жазық айнамен салыстырғанда 3 есе кем ( $SA = 0$ ). Бұл біртекті өріспен дипольдің суперпозициясы болып табылатын біртекті емес, гиперболалық заң бойынша кемитін электрстатикалық өріс негізінде құрылған айналы талдағышта жазық айна жағдайымен салыстырғанда энергия бойынша ажыратуын бірнеше есе жақсартуға болатындығын білдіреді.

Модификацияланған электрстатикалық өріске ие айна негізінде талдаушы жүйенің электрондық-оптикалық қасиеттерін теориялық зерттеу жүргізілген. Бөлшектерінің траекториясының көзден кескінге дейін оське толық проекциясының теңдеуі алынды. Біртекті емес өріске ие электронды-оптикалық айнардың абберациялық көмескілеу функциялары есептелген. Біртекті емес өріс негізіндегі талдағыш сұлбасының анықталған ең оптималды нұсқасы жазық айнаға қарағанда жоғары ажырату қабілетіне ие.

## **2.2 Біртекті емес электрстатикалық өріс негізінде айналы энергия талдағыштың сұлбасын модельдеу**

Берілген параграфта біртекті емес өріс негізіндегі жазық симметриялық айналы энергия талдағышының электронды-оптикалық сұлбасын сандық модельдеудің нәтижелері келтірілген. Ұсынылған құрылғының электронды-оптикалық сипаттамаларын талдау үшін қажетті талдағыш өрісіндегі зарядталған бөлшектердің траекториясын есептеу «Фокус» бағдарламасын қолдана отырып сандық есептеу әдісі негізінде жүргізілді [146]. «Фокус» бағдарламасы тұрақты және айнымалы электрлік өрістермен қоректену режиміндегі кез келген пішінді электродтардан құрылатын аксиалды-симметриялық электронды және ионды-оптикалық жүйелерді модельдеуге арналған. Бұл бағдарлама бірнеше модульдерден (графикалық редактор,

электрлік өрістерді есептеу модулі, траекториялық талдау модулі) құрылады, олардың арасындағы ақпарат өзара тасымалдау мәліметтер файлдары көмегімен жүзеге асырылады.

Графикалық редактор модулі сәйкесті потенциал берілетін электродтар жүйесінің радиалды қимасын құрастыруға мүмкіндік береді. Әр электродтың қимасы оның ішкі кез келген нүктесіне қатысты сағат тіліне қарама-қарсы бағытталған тұйық контур түрінде кескінделеді.

Потенциалдың таралу функциясын есептеу модулінде сингулярлы және квази-сингулярлы интегралдарды есептеу әдістемесімен дамытылған шекаралық элементтер әдісі [147] іске асырылады. Бұл әдістің негізінде Дирихленің сыртқы есебі шешіледі, Дирихленің ішкі есебін шешумен салыстырғанда бұл жағдайда конструкциялары реал жағдайларға максималды жақын болатын электронды-оптикалық жүйелерді модельдеу мүмкіндігі беріледі. Потенциалдың таралу функциясын есептеу модулі электродтардың модификациясын сандық түрде беруге, өрістің есептелінетін облысын арттыру мақсатында конструкцияның қажетті масштабын беруге, кейін таңдалған дәлдікпен электростатикалық өрістегі зарядталған бөлшектер траекторияларын есептеу үшін қолданылатын облыс шекарасында нормаль туынды потенциал мәндерінің массивін есептеуге мүмкіндік береді. Нормаль туындыларды есептеуден кейін, кеңістіктің кез келген нүктесіндегі потенциалды есептеу, немесе таңдалған облыстағы потенциалдың таралуын есептеу мүмкіндігі беріледі. Ақырғы жағдайда потенциал массиві айнымалы электрлік өрістегі зарядталған бөлшектер траекторияларын модельдеу үшін қолданылады.

Электрстатикалық өрістегі зарядталған бөлшектер траекторияларын модельдеу модулі бастапқы энергияға ие болатын және бастапқы бұрыштардың кейбір диапазоны үшін нүктелік немесе созылыңқы көзден ұшып шыққан зарядталған бөлшектердің траекториялар жиынын есептеуге мүмкіндік береді. Бұл модуль есептеу нәтижелерін графикалық және сандық түрде бере алады. Егер есептелген траекториялар саны 5-тен артық болса, онда жоғары ретті бұрыштық тоғыстау шартын анықтауы жүзеге асырылады. Анықтаудың нәтижелері тоғыстау

реті, тоғыстаудың центрлік бұрышы және тоғыс нүктесінің координаталары болып табылады. Сонымен бірге бұл модульде зарядталған бөлшектердің бастапқы энергиялары бойынша электронды-оптикалық жүйенің өткізу функциясын (аппараттық функцияны) құру мүмкіндігі іске асырылады [148].

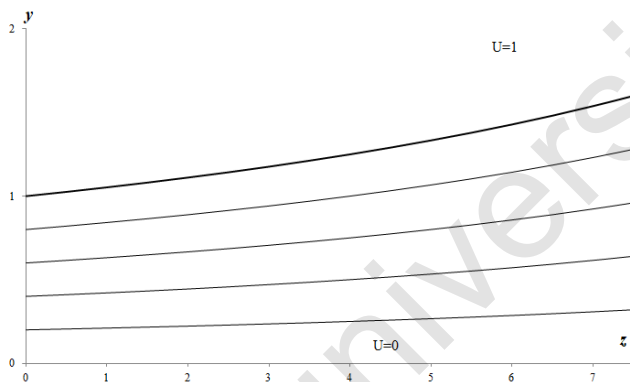
Алғаш рет жазық айнаны энергия талдағышы ретінде қолдану [149] жұмыста сипатталған. Жазық айна түріндегі талдағыштың жақсы тоғыстаушы қасиеттерімен үйлескен конструкцияның қарапайымдылығы оны спектроскопиялық зерттеулерде кеңінен қолдануға мүмкіндік береді. Бұл талдағыш екі жазықтық-параллель пластиналардан тұрады, оларға ауытқу потенциалдар айырмасы беріледі. Біртекті электрстатикалық өрісте екінші электрондар ағыны шашырату бұрышының шамасы бойынша бірінші жуықтауда бағытталған. Бұл құрылғының кемшілігі - бұрыштық тоғыстың төмен (бірінші) реттілігі.

Сондай-ақ, екі жазық электродтан, кіріс және қабылдау саңылауларынан тұратын энергия талдағышы белгілі [150]. Төменгі пластинаның жазықтығына  $30^\circ$  бұрышпен өріске ұшатын зарядталған бөлшектердің шоғы үшін екінші ретті бұрыштық тоғыстау орындалады. Бұл жағдайда спектрді тіркеу үшін конустық детектор немесе сақинаның артындағы конустың бойында орналасқан көптеген детекторлар қажет. Мұндай құрылғының кемшіліктері – детектор жасаудың күрделілігі.

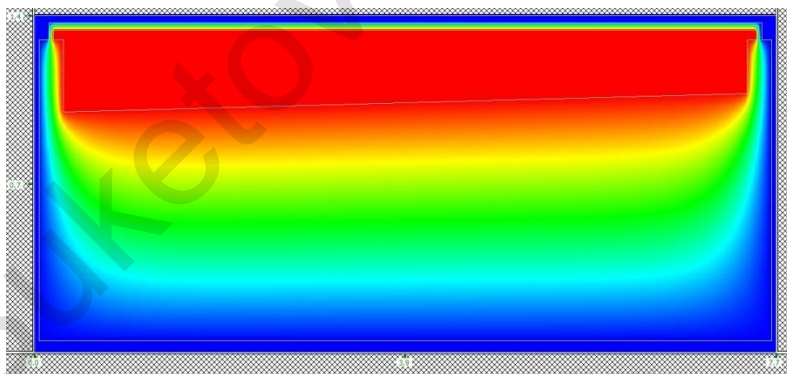
Электрондық оптикада зарядталған бөлшектің траекториясын  $E$  энергияның абсолютті мәні емес, ал  $E/U=C$  қатынасы анықтайды. Мұндағы  $U$  - электронды-оптикалық сұлбасының ауытқытушы немесе тоғыстаушы электродтың потенциалы. Бұл жағдайда  $U$  потенциалының әрбір мәні үшін коллектормен  $R=\Delta E/E$  ажыратудың тұрақты мәнін қамтамасыз ететін  $\Delta E=\Delta E(U)$  диапазонындағы бөлшектер тіркеледі. Сондықтан траекторияларды есептеу кезінде зарядталған бөлшектердің энергиясын  $E/V$  деп берілді.

Сыртқы ауытқытушы электродтың пішіні біртекті емес өрістегі эквипотенциалды сызықтарды есептеулерден анықталады. 2.3-суретте  $A = 0,05$  мәні үшін электрстатикалық біртекті емес өрістегі эквипотенциалды сызықтардың суреті ұсынылған.

2.4-суретте электронды-оптикалық жүйедегі өрістің таралу функциясы көрсетілген. Мұнда біз бүкіл облыстағы өрістің түстермен боялуын көріп отырмыз. Әрбір нүктедегі түске потенциал шамасы сәйкес келеді. Потенциал жоғарылаған сайын, түс «жылылырақ» екендігін көруге болады.



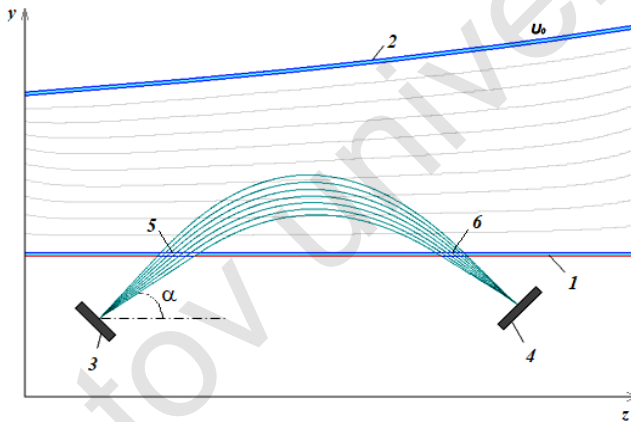
2.3-сурет.  $A = 0,01$  мәні кезіндегі біртекті емес өрістегі экvipотенциалдық сызықтар



2.4-сурет. Біртекті емес өрістің таралу функциясы

2.5-суретте  $A = 0,05$  мәні кезінде энергия талдағыштың бойлық қимасының сұлбасы ұсынылған. Талдағыш өрісі біртекті

емес, гиперболалық заң бойынша кемиді және біртекті өріс пен дипольдің суперпозициясы болып табылады. Талдағыш екі электродтан құрылады, электродтардың біреуі жазық (1) және нөлдік потенциалдың астында, ал екінші электрод (2) гиперболалық пішінге ие және  $U_0$  потенциалының астында. Төменгі жазық (1) пластинада зарядталған бөлшектердің шоғының қозғалысы үшін кіру (5) және шығу (6) саңылаулары бар. Мұнда жүйенің  $y, z$  жазықтығымен көлденең қимасы көрсетілген. Зарядталған бөлшектердің энергиясының ауытқушы электродының потенциалына қатынасы  $E/U = E[\text{эВ}]/U[\text{В}] = 1.0$ . Зарядталған бөлшектер көзі  $x=2, y=0,42$  нүктесінде орналасқан.



1 - төменгі жазық электрод, 2 – гиперболалық пішінге ие жоғарғы ауытқытушы электрод, 3 - нүктелік көзі бар зерттелетін үлгі, 4 - детектор, 5 - кіру саңылауы, 6 – шығу саңылауы

2.5-сурет. Біртекті емес өріс негізделген энергия талдағыштың бойлық қимасының сұлбасы

Сұлбаға сәйкес, төменгі пластинаның маңында орналасқан зерттелетін үлгіден (3) шығарылған (5) екінші ретті электрондар талдағыш өрісіне төменгі пластина жазықтығымен  $\alpha$  кейбір бұрыш жасай кіреді. Біртекті емес өрістің әсерінен электрондар шоғы төменгі электродқа оралып, шығу саңылауынан (6) өтіп,

нүктелік кескінге тоғысталады, кейін детектормен (4) тіркеледі. Жоғарғы электродтың  $U_0$  ауытқу потенциалын өзгерту арқылы зарядталған бөлшектердің бүкіл энергия спектрін талдауға болады.

2.2-кестеде біртекті емес өріс негізіндегі энергия талдағышының тоғыстық қасиеттерінің сандық есептеу нәтижелері келтірілген. Тоғыстаушы қасиеттерінің есептеулерінен бұл электронды-оптикалық сұлбада өріске кіру бұрыштарын өзгертудің кең аралығы үшін ( $24^0$ - $36^0$ ) орталық бұрышы  $30,7^0$  болатын екінші ретті бұрыштық тоғыстау режимі жүзеге асырылатыны анықталды. Жоғарғы ауытқытушы электродтың гиперболалық пішінінің арқасында талдағыштың ажырату екінші ретті бұрыштық тоғыстау режимінде біртекті жазық айна өрісі жағдайында шашырату бұрышы  $\Delta\alpha = \pm 6^0$  болатын бөлшектер шоғы үшін үш есе жоғары.

2.2-кесте. Біртекті емес өріс негіздегі энергия талдағыштың тоғыстаушы қасиеттері

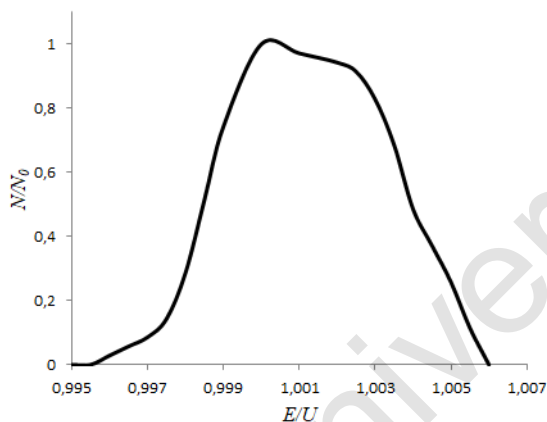
Тоғыстау реттілігі	2
Тоғыстаудың орталық бұрышы	$30.7^0$
Тоғыс нүктесінің $X_{\text{foc}}$ координатасы	5.04
Тоғыс нүктесінің $Y_{\text{foc}}$ координатасы	0.42
Шағылу параметрі	1

Нүктелік көз жағдай үшін энергия талдағыштың аппараттық функциясы есептелген. Аспаптың аппараттық функциясын есептеу үшін зарядталған бөлшектер  $20^0 \pm 6^0$  бастапқы бұрыштар диапазонында және  $0,995 - 1,005$  эВ/В энергия диапазонында (нақтыырақ  $E/V$ ) нүктелік көзден ұшып шығады. 2.6-суретте нүктелік көз жағдайы үшін жүйенің аппараттық функциясы келтірілген.

Аппараттық функцияның жартылай биіктігіндегі аспаптың салыстырмалы энергиялық ажыратуы  $0,85\%$ , ал жарық күші  $\Omega/2\pi = 10,45\%$  құрайды.

Ұсынылған энергия талдағышы мен [1,2] жұмыстардағы айналармен салыстырмалы талдаудан, жүйенің бөлшектердің бұрыштық тоғыстау реттілігі жоғары екенін көрсетті. Сондай-ақ,

энергия талдағыш сұлбасының артықшылығы - қарапайым конфигурацияды детектордың қолданылуы (жазық жолақ түрінде), жоғары ажырату қабілеттілігі.



2.6-сурет. Біртекті емес өріс негізделген энергия талдағыштың аппараттық функциясы

Ұсынылған жазықсимметриялық электронды-оптикалық жүйе зарядталған бөлшектердің таралуын жоғары ажырату қабілеттілігімен энергия бойынша талдауға мүмкіндік береді. Сұлба орталық бұрышы  $30^\circ$  болатын екінші ретті бөлшектердің шоқтарының бұрыштық тоғыстау режимін қамтамасыз етеді.

### 3 ГЕКСАПОЛЬДИ-ЦИЛИНДРЛІК ӨРІС НЕГІЗІНДЕГІ ЭЛЕКТРСТАТИКАЛЫҚ ЭНЕРГИЯ ТАЛДАҒЫШТАРЫНЫҢ КОРПУСКУЛАЛЫ-ОПТИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ

#### 3.1 Электрстатикалық өрістерді синтездеу үшін мультипольдік әдісті қолдану

Электрстатикалық өрістерді талдауда мультипольдік әдісті қолдану айрықша орынға ие [151,152]. Мультипольдік өрістер деп бірдей орналасқан  $N$  симметриялы немесе антисимметриялы жазықтықтарды айтамыз. Олардың атауы – мұндай өрістерді электродтар мен полустер жиынтығы көмегімен құруға болатындығынан шығады. Әдетте оларды электрондық және иондық оптикада тоғыстырушы, ауытқытушы және түзетуші элементтер ретінде қолданады. Цилиндрлік жүйе координатасындағы потенциалды  $N$  симметрия жазықтығына ие мультипольді өріс үшін келесі түрде жазуға болады:

$$U(r, \alpha, z) = \sum_{n=0}^{\infty} A_{n,N}(r, z) r^{nN} \cos nN\alpha.$$

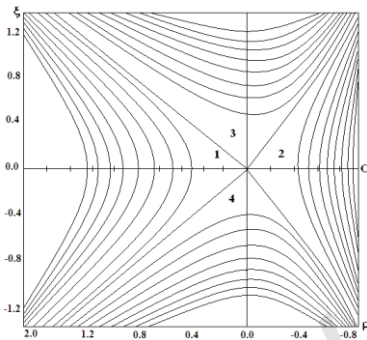
$n=0$  сәйкес келетін мүше өрістің аксиалды-симметриялық құраушысын сипаттайды. Басқа мүшелері үшін сәйкесті потенциалдарын келесі түрде жазуға болады:

$$U(r, \alpha, z) \Big|_{nN=m=const} = A_m(r, z) r^m \cos m\alpha.$$

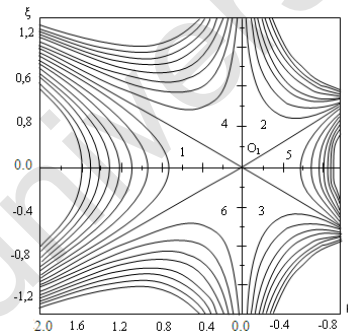
$m=1$  болғанда, бұл теңдеу шексіз жазық конденсатор потенциалының таралуын сипаттайды  $U(x,y)=A_1x$ .  $m=2$  үшін бұл теңдеу мынадай болады  $U(x,y)=A_2(x^2-y^2)$ . Потенциалдың бұл таралуы квадрупольмен түсіндіріледі, яғни кезектесіп келіп отыратын төрт бірдей шексіз гиперболалық беттердің потенциалдарымен. Сәйкесінше  $m=3$  гексапольға,  $m=4$  октупольге,  $m=5$  декапольға сәйкес келеді [153-155].

$\xi=0$  жазықтығында таралатын потенциалы  $V = \sum_{k=0}^N [A_k \ln R + B_k] R^{2k}$  түрінде болатын  $(R, \xi)$  цилиндрлік координата жүйесінде Дирихле есебін шешуге негізделген мультипольді-цилиндрлік өрістерді есептеу әдістері [154]-жұмыста көрсетілген.

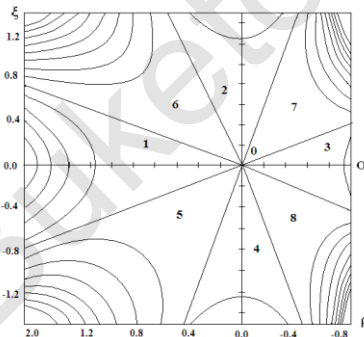
3.1-суретте цилиндрлік мультипольдің эквипотенциалдар тобы бейнеленген, олар симметрия жазықтығына ие. Өрістерді қосқанда мультипольдің орталық шеңбері нөлдік эквипотенциал арқылы логарифмдік өріске бірігеді.



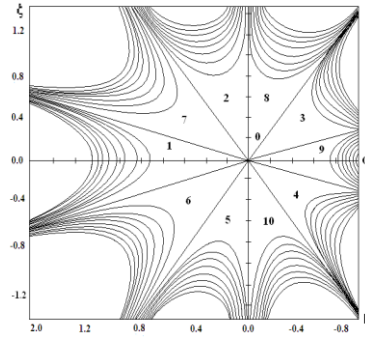
а) Цилиндрлік квадруполь



ә) Цилиндрлік гексаполь



б) Цилиндрлік октуполь



в) Цилиндрлік декаполь

3.1-сурет. Симметрия жазықтығына ие цилиндрлік мультипольдің эквипотенциалдар тобы

[81,82] жұмыстарда цилиндрлік типті электрстатикалық өріс пен мультипольдерді қосу негізінде құрастырылған өстік симметриялық Лаплас өрістерінің қатары ұсынылды.

Синтезделген мультипольді-цилиндрлік өрістердің бұл қатарының корпускулалы-оптикалық қасиеттерін зерттеу зарядталған бөлшектер ағындарының жаңа энергиялық талдау жүйелерін құрастыруды практикалық қызығушылық тудырады. Мұндай энергия талдағыш жүйелерін есептеу мен құрастырудағы негізгі қиындық зарядталған бөлшектердің траекториясын аналитикалық түрде сипаттау мәселесімен байланысты. Бұл мәселені шешу корпускулалы-оптикалық жүйенің максималды ажыратуын анықтайтын абберрацияларын бағалау үшін қажет.

[88, 195 б.] жұмыста өстік симметриялық мультипольді-цилиндрлік өріс негізіндегі айналы талдағыштардың сұлбаларын есептеу кезінде корпускулалы-оптикалық параметрлерді анықтау үшін зарядталған бөлшектердің траекторияларын есептеудің жуық-аналитикалық әдісі ұсынылды. Ұсынылған математикалық модельді қолдана отырып, гексапольді-цилиндрлік өрістегі (ГЦӨ) зарядталған бөлшектердің қозғалысының траекториялық есептеуін ұсынамыз. ГЦӨ-тің потенциалы келесі түрге ие [156]:

$$U(r, z) = \mu \ln r + \gamma U_h(r, z), \quad (3.1)$$

мұндағы

$$U_h(r, z) = \frac{1}{2} \left\{ Lnr \left[ z^2 - \frac{1}{2} r^2 - \frac{1}{2} \right] + \frac{1}{2} r^2 - \frac{1}{2} \right\} \quad (3.2)$$

- дөңгелектік гексаполь,  $\mu$  - цилиндрлік өрістің салмақ үлесін анықтайтын коэффициент,  $\gamma$  - дөңгелектік гексапольдің салмақ құраушысы.

Бұл тарауда ГЦӨ-тің әр түрлі  $\mu$  және  $\gamma$  коэффициенттері үшін, яғни цилиндрлік өріс пен дөңгелектік гексапольдің әр түрлі үлестері үшін электронды-оптикалық сұлбаларды есептеу және модельдеу нәтижелері келтірілген.

### 3.2 $\mu = 1, \gamma = 1$ кезінде гексапольді-цилиндрлік энергия талдағышының электронды-оптикалық сұлбасын есептеу және модельдеу

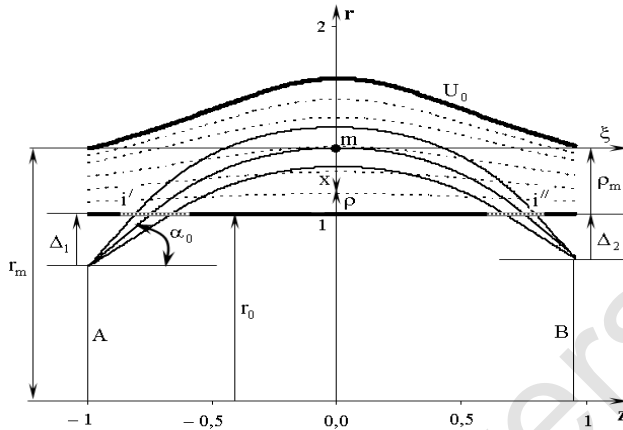
Бұл бөлімде потенциалы  $r, z$  координаталар жүйесінде келесі өрнекпен сипатталатын өрістегі зарядталған бөлшектің қозғалысы зерттелген:

$$U(r, z) = \ln r + U_h(r, z). \quad (3.2)$$

Цилиндрлік өріс пен гексапольдің сәйкесті  $\mu = 1$  және  $\gamma = 1$  үлестері үшін өрістің таралуына ие энергия талдағыштың сұлбасы 3.2-суретте келтірілген. ГЦӨ Жердің потенциалы астындағы цилиндрлік пішіндегі ішкі электрод пен  $U_0$  ауытқушы потенциалына ие қисықсызықты пішінге ие сыртқы электрод арасындағы кеңістікте құрылады. Сұлбаға сәйкес, А сақиналы көзден шыққан зарядталған бөлшектердің шоғы талдағыш өрісімен шағылып, В сақиналы кескінге тоғысталады.

Сақиналы көз мен сақиналы кескін көбінесе конструктивті жағынан қажет болып табылады. Сақиналы электронды-оптикалық көз (мысалы, үлкен аудан үлгісінен бөлшектер ағынымен сәулеленетін сақиналы диафрагма) рентген сәулесімен электрондарды қоздыру кезінде, растрлық микроскопияда және т.б. қолданылады [157].

Электронды-оптикалық сұлбаны есептеу үшін әрі қарай [158] жұмыста ұсынылған келесі процедураны (3.3-3.13 формулалары) қолданамыз. Өрістегі бөлшектердің қозғалыс траекториясының бастапқы нүктесін траекторияның  $m$  төбесіне ауыстырылады. Сонымен,  $x, \xi$  координаталар басын  $m$  нүктесіне орналастырылды (3.2-суретті қараңыз). Есептеулердегі бүкіл сызықтық өлшемдер ішкі цилиндрлік электродтың  $r_0$  радиусының үлестерінде көрсетіледі.



A – зарядталған бөлшектердің көзі,  $i'$  - кіру сақиналы саңылауы,  
 $i''$  - шығу сақиналы саңылау, B - детектор

3.2- сурет.  $\mu = 1, \gamma = 1$  кезіндегі ГЦӨ негізіндегі энергия талдағыштың сұлбасы

$$\frac{r}{r_0} = \frac{r_0 + r_0 \rho}{r_0} = 1 + \rho, \quad x = \frac{r_m - r}{r_0} = \rho_m - \rho, \quad \xi = \frac{z}{r_0}. \quad (3.3)$$

$x, \xi$  жаңа координаталар жүйесінде (3.2) өрістегі потенциалдың таралуы келесі түрге ие болады:

$$U(x, \xi) = U_0 g(x, \xi), \quad (3.4)$$

мұндағы

$$g(x, \xi) = \ln(R - x) \left[ \frac{1}{2} \xi^2 - \frac{1}{4} (R - x)^2 + \frac{3}{4} \right] + \frac{1}{4} (R - x)^2 - \frac{1}{4},$$

$$R = 1 + \rho_m. \quad (3.5)$$

(3.4) өрістегі зарядталған бөлшектің қозғалысы келесі теңдеулер жүйесімен сипатталады:

$$m\ddot{x} = qU_0 \varepsilon_1, \quad \varepsilon_1 = -\frac{\partial g(x, \xi)}{\partial x}, \quad (3.6)$$

$$m\ddot{\xi} = qU_0 \varepsilon_2, \quad \varepsilon_2 = -\frac{\partial g(x, \xi)}{\partial \xi}. \quad (3.7)$$

Бөлшек траекториясы бойымен  $m$  төбесінен кез келген нүктеге дейін аралықта (3.6) және (3.7) теңдеулердің интегралдау электрстатикалық өрісте қозғалатын бөлшек үшін энергияның сақталу заңына әкеледі. Бұл өрнек бөлшектің кинетикалық энергиясының өзгеруін оның өткен потенциалдар айырымымен байланыстырады

$$\frac{m v_m^2}{2} - \frac{m}{2} \left( \dot{x}^2 + \dot{\xi}^2 \right) = -q(U_m - U) = -qU_0(g_0 - g_x). \quad (3.8)$$

мұндағы  $U_m = U_0 g(x_m, \xi_m) = U_0 g_0$  -  $m$  нүктесіндегі өрістің потенциалы, мұнда  $x_m = \xi_m = 0$ ,  $g_x = g(x, \xi(x))$ .

$\frac{m \dot{\xi}^2}{2}$  шаманы (3.7) екінші теңдеуді  $m$  нүктесінен бөлшектің траекториясының кез келген нүктесіне дейінгі аралықта интегралдау арқылы анықтаймыз. Бұл ретте  $v_m^2 = \dot{\xi}_m^2 + \dot{x}_m^2 = \dot{\xi}_m^2$  екендігін ескереміз, себебі траекториясының төбесінде  $\dot{x}_m = 0$ .

$$\dot{\xi} = \frac{d\xi}{dt} = \frac{d\xi}{dx} \frac{dx}{dt} = \dot{\xi}' \& \text{ қатынасты қолдана отырып, келесіні}$$

аламыз:

$$\frac{m v_m^2}{2} - \frac{m \dot{\xi}^2}{2} = qU_0 \int_x^{x_m} \frac{\partial g(x, \xi)}{\partial \xi} \frac{d\xi}{dx} dx = qU_0 \int_0^x \ln(R-x) \xi \xi' d\xi. \quad (3.9)$$

3.2-суретке сәйкес  $x = \rho_m$  кезінде  $\frac{m\xi^2}{2} = W \cos^2 \alpha_0$ ,

сондықтан (3.9)-теңдеуді  $\frac{mV_m^2}{2}$  -ге қатысты келесі түрде қайта жазуға болады:

$$\frac{mV_m^2}{2} = W \cos^2 \alpha + qU_0 f_m,$$

$$f_m = \int_0^{\rho_m} \frac{\partial g(x, \xi)}{\partial \xi} \frac{d\xi}{dx} dx = \int_0^{\rho_m} \ln(R-x) \xi \xi' d\xi. \quad (3.10)$$

Әрі қарай (3.9), (3.10) өрнектерді (3.8)- теңдеуге қойсақ, ГЦӨ-ге зарядталған бөлшек қозғалысының интегро-дифференциалдық теңдеуін аламыз:

$$(\xi')^2 \left[ g_0 - g_x + \int_0^x \ln(R-x) \xi \xi' dx \right] = P^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha_0 + f_m - \int_0^x \ln(R-x) \xi \xi' dx, \quad (3.11)$$

мұндағы

$$g_0 = g(x_m, \xi_m) = \ln R \left[ \frac{R^2}{4} + \frac{3}{4} \right] - \frac{R^2}{4} + \frac{1}{4} \quad (3.12)$$

және  $P_0^2 = \frac{W}{qU} \sin^2 \alpha_0$  - ГЦӨ-тің геометриялық және энергиялық

параметрлерін байланыстыратын шағылу параметрі.

(3.11) интегро-дифференциалдық теңдеуді шешу үшін дәрежелі қатарға жіктеу әдісін қолдандық. (3.11) интегро-дифференциалдық теңдеудегі ізделінетін  $(\xi')^2$  функция  $x = 0$  ерекше нүктеде үзілуге ие, бұл жағдайда  $(\xi')^2$  көбейткіші нөлге айналады. Ізделінетін функцияны қарапайым дәрежелі қатар түрінде келтіруге болмайды, сондықтан теңдеудің шешімі

$$\xi = x^\rho \sum_{n=0}^{\infty} C_n x^n \text{ жалпыланған қатар түрінде ізделінеді. (3.11)}$$

теңдеудің жалпыланған қатарға алдын-ала жіктеуден параметрдің  $\rho = \frac{1}{2}$  мәні анықталды. Сонымен теңдеудің шешімін келесі бөлшекті-дәрежелі қатар түрінде іздеу керек:

$$\xi = \sqrt{x} (C_0 + C_1 x + C_2 x^2 + C_3 x^3 + C_4 x^4 + C_5 x^5 + C_6 x^6 + \dots). \quad (3.13)$$

Төменде (3.13) бөлшекті-дәрежелі қатарды (3.11)-теңдеуге қою арқылы есептелген  $C_n$  коэффициенттері келтірілген:

$$C_0^2 = 4 \frac{P^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha_0 - f_m}{\gamma}, \quad \gamma = \frac{1}{4} \left( R + \frac{3}{R} - 2R \ln R \right) \quad (3.14)$$

$$\frac{C_1}{C_0} = \frac{1}{\gamma} \left[ -\frac{C_0^2}{24R} - \frac{3}{8} \ln R - \frac{11}{16R^2} - \frac{1}{48} \right] \quad (3.15)$$

$$\frac{C_2}{C_0} = -\frac{9}{10} \frac{C_1^2}{C_0^2} + \frac{1}{\gamma} \times \left[ \frac{C_1}{C_0} \left( -\frac{11}{60} \frac{C_0^2}{R} - \frac{11}{20} \ln R - \frac{9}{40R^2} - \frac{3}{40} \right) - \frac{1}{60} \frac{C_0^2}{R^2} - \frac{1}{40R^3} + \frac{13}{120R} \right], \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} \frac{C_3}{C_0} = & -\frac{15}{7} \frac{C_1 C_2}{C_0^2} + \frac{1}{\gamma} \left[ \frac{C_2}{C_0} \left( -\frac{11}{56} \frac{C_0^2}{R} - \frac{13}{28} \ln R - \frac{15}{56R^2} - \frac{5}{56} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{C_1^2}{C_0^2} \left( -\frac{5}{16} \frac{C_0^2}{R} - \frac{17}{56} \ln R - \frac{27}{112R^2} - \frac{9}{112} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{C_1}{C_0} \left( -\frac{5}{56} \frac{C_0^2}{R} - \frac{3}{28R^3} + \frac{19}{84R} \right) - \frac{C_0^2}{112R^3} - \frac{3}{224R^4} + \frac{17}{672R^2} \right] \end{aligned} \quad (3.17)$$

Әрі қарай коэффициенттер  $x$  шамасы бойынша 6 реттілікке дейін есептелді.

(3.14)-(3.17) теңдеулерінен көрініп отырғандай,  $\xi = \sqrt{x} \sum_{g=0}^{\infty} C_n x^n$  функцияны есептеу үшін қажетті бүкіл  $C_n$

коэффициенттер траекторияның бұрылу нүктесінің радиалды  $R$  координатасынан тәуелді екенін көруге болады. Бұл құраушыны (3.11) интегро-дифференциалдық теңдеуден  $x = \rho_m$  шарты кезінде табуға болады.

Бұл жағдайда  $(\xi')^2 = \text{ctg}^2 \alpha_0$ ,  $g_{x=\rho_m} = 0$  және

$$g_0 + f_m = P^2. \quad (3.18)$$

(3.12) теңдеуден  $g_0$  шаманы (3.18)-теңдеуге қою арқылы біз трансценденттік теңдеуге келеміз:

$$\ln R = \frac{4(P^2 - f_m) - R^2 + 1}{3 - R^2} \quad (3.19)$$

(3.19) өрнектен  $R$  шамасы тізбектей жуықтау әдісімен анықталады. Нөлдік жуықтау ретінде цилиндрлік айналы талдағыштың параметрлері қолданылады [159]:

$$R_0 = \exp P^2 = 1 + P^2 + \frac{1}{2} P^4 + \frac{1}{6} P^6 + \frac{1}{24} P^8 + \dots \quad \text{және} \quad f_{m_0} = 0$$

Тізбектей жуықтау әдісімен есептеу реттілігі келесідей [158, 132 б.]:

1) Нөлдік жақындау көмегімен  $C_n$  коэффициенттерді анықтаймыз.

2) (3.19) өрнектен бірінші жуықтауда траекторияның бұрылу нүктесінің  $R_1$  радиалды координатасын табамыз.

3)  $C_n$  мен  $f_m$  коэффициенттерді бірінші жақындауда анықтаймыз.

4) Бірінші жуықтау мәліметтерін қолдана отырып, екінші жуықтауда  $R_2$  шамасын анықтаймыз және т.с.с.

Төменде ГЦӨ-тегі бөлшектердің траекториясын есептеу нәтижелері келтірілген. Бүкіл есептеулер 14 реттілікке дейінгі дәлдікпен  $P$  шамасы бойынша қатарға жіктеу түрінде алынды:

$$\begin{aligned} \rho_m = & P^2 + \frac{1}{2}P^4 + \left[-\operatorname{ctg}^2\alpha_0 + \frac{1}{3}\right]P^6 + \left[-\frac{23}{9}\operatorname{ctg}^2\alpha_0 + \frac{3}{8}\right]P^8 + \\ & + \left[\frac{20}{9}\operatorname{ctg}^4\alpha_0 - \frac{313}{60}\operatorname{ctg}^2\alpha_0 + \frac{53}{120}\right]P^{10} + \\ & + \left[\frac{1007}{90}\operatorname{ctg}^4\alpha_0 - \frac{67631}{6300}\operatorname{ctg}^2\alpha_0 + \frac{79}{144}\right]P^{12} + \dots \end{aligned} \quad (3.20)$$

$\xi_m$  - бөлшектің өріске кіру нүктесінен траекторияның  $m$  бұрылу нүктесіне дейін айнаның симметрия осіне проекциясы (3.13) өрнегімен  $x = \rho_m$  шарты орындалғанда анықталады:

$$\xi_m = \xi(x)|_{x=\rho_m} = \sqrt{\rho_m} C_0 S, \quad (3.21)$$

мұндағы

$$\begin{aligned} C_0 = \operatorname{ctg} \alpha_0 & \sqrt{4P^2 + 4P^4 + 8P^6 + \left(-4\operatorname{ctg}^2\alpha_0 + \frac{146}{9}\right)P^8 +} \\ & + \left(-\frac{208}{9}\operatorname{ctg}^2\alpha_0 + \frac{297}{10}\right)P^{10} + \\ & + \left(\frac{80}{9}\operatorname{ctg}^4\alpha_0 - \frac{3953}{45}\operatorname{ctg}^2\alpha_0 + \frac{176737}{3150}\right)P^{12} + \dots \end{aligned} \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned}
S &= \left( 1 + \frac{C_1}{C_0} \rho_m + \frac{C_2}{C_0} \rho_m^2 + \frac{C_3}{C_0} \rho_m^3 + \frac{C_4}{C_0} \rho_m^4 + \frac{C_5}{C_0} \rho_m^5 + \frac{C_6}{C_0} \rho_m^6 \right) = \\
&= 1 - \frac{1}{12} P^2 + \left( -\frac{1}{6} \operatorname{ctg}^2 \alpha_0 - \frac{131}{480} \right) P^4 + \left( -\frac{53}{360} \operatorname{ctg}^2 \alpha_0 - \frac{17573}{40320} \right) P^6 + \\
&+ \left( 0,26389 \operatorname{ctg}^4 \alpha_0 + 0,34595 \operatorname{ctg}^2 \alpha_0 - 0,50249 \right) P^8 + \\
&+ \left( 0,81703 \operatorname{ctg}^4 \alpha_0 + 1,83040 \operatorname{ctg}^2 \alpha_0 - 0,70059 \right) P^{10} + \dots
\end{aligned} \tag{3.23}$$

А көзден оның В кескінге дейінгі траекторияның симметрия осіне толық проекциясы:

$$l = \frac{l}{r_0} = \Delta \operatorname{ctg} \alpha_0 + 2\xi_m, \quad \Delta = \Delta_1 + \Delta_2, \tag{3.24}$$

мұндағы  $\Delta_1$  және  $\Delta_2$  - көздің және оның кескінінің ішкі цилиндрлік электродтың бетінен ара-қашықтығы (3.2-сурет).

Сонымен, ГЦӨ-тегі зарядталған бөлшектердің траекториялары үшін өрнекті анықтай отырып, энергия талдағыштың барлық қажетті электронды-оптикалық сипаттамаларын есептеуге болады.

Электрстатикалық ГЦӨ-талдағышының параметрлерін талдау үшін 1-ші, 2-ші және 3-ші ретті кеңістіктік тоғыстау

коэффициенттері есептелді:  $A_I = \frac{dl}{d\alpha}$ ,  $A_{II} = \frac{1}{2!} \frac{d^2 l}{d\alpha^2}$ ,  $A_{III} = \frac{1}{3!} \frac{d^3 l}{d\alpha^3}$

. 2-ші ретті бұрыштық тоғыстау шарттары табылды:

$$\frac{dl}{d\alpha} = \frac{d^2 l}{d\alpha^2} = 0.$$

3.1-кестеде екінші ретті бұрыштық тоғыстау шарты орындалғандағы айнаның  $P = \sqrt{mV_0^2/2qU_0} \sin \alpha_0$  шағылу параметрінен ( $m$ ,  $V_0$  және  $q$  - талданатын бөлшектердің массасы, жылдамдығы және заряды) және траекторияның  $\alpha_0$  кіру бұрышынан тәуелді ГЦӨ-талдағышының есептелген негізгі электрондық-оптикалық параметрлері келтірілген.

3.1-кесте.  $\mu = 1$ ,  $\gamma = 1$  кезіндегі ГЦӨ-галдағыштың электрондық-оптикалық параметрлері

$P$	$\alpha_0$ (град.)	$\rho_m$	$\Delta$	$\xi_m$	$l$	$D$	$A_{III}$
0,1	30,3300	0,0100	0,0101	0,0344	0,1032	0,0693	-0,3114
0,12	30,4780	0,0145	0,0145	0,0494	0,1481	0,0997	-0,4426
0,14	30,6510	0,0198	0,0198	0,0670	0,2009	0,1356	-0,5932
0,16	30,8520	0,0259	0,0260	0,0871	0,2611	0,1769	-0,7604
0,18	31,0790	0,0328	0,0330	0,1097	0,3287	0,2235	-0,9417
0,2	31,3342	0,0406	0,0408	0,1347	0,4033	0,2752	-1,1334
0,22	31,6161	0,0493	0,0495	0,1619	0,4845	0,3320	-1,3320
0,24	31,9253	0,0588	0,0590	0,1913	0,5720	0,3936	-1,5331
0,26	32,2613	0,0691	0,0694	0,2227	0,6651	0,4596	-1,7324
0,28	32,6238	0,0803	0,0805	0,2560	0,7636	0,5298	-1,9254
0,3	33,0120	0,0922	0,0924	0,2911	0,8667	0,6037	-2,1075
0,32	33,4251	0,1050	0,1050	0,3278	0,9740	0,6809	-2,2744
0,34	33,8615	0,1185	0,1184	0,3660	1,0848	0,7609	-2,4222
0,36	34,3192	0,1328	0,1323	0,4055	1,1987	0,8431	-2,5475
0,38	34,7954	0,1477	0,1468	0,4463	1,3151	0,9272	-2,6471
0,4	35,2868	0,1633	0,1618	0,4882	1,4337	1,0125	-2,7177
0,42	35,7893	0,1795	0,1773	0,5311	1,5541	1,0987	-2,7551
0,44	36,2988	0,1963	0,1932	0,5750	1,6761	1,1852	-2,7533
0,46	36,8114	0,2136	0,2094	0,6199	1,7994	1,2720	-2,7026
0,48	37,3254	0,2312	0,2259	0,6656	1,9237	1,3588	-2,5876
0,5	37,8455	0,2493	0,2425	0,7120	2,0482	1,4457	-2,3843
0,52	38,3918	0,2679	0,2588	0,7586	2,1704	1,5330	-2,0545
0,54	39,0245	0,2869	0,2741	0,8038	2,2841	1,6199	-1,5385
0,56	39,9046	0,3066	0,2861	0,8439	2,3721	1,7016	-0,7604
0,5754	40,9766	0,3225	0,2899	0,8657	2,3991	1,7516	0,0000
0,58	41,3980	0,3274	0,2896	0,8698	2,3965	1,7626	0,2201
0,6	43,7420	0,3498	0,2811	0,8763	2,3401	1,7967	0,7340
0,62	46,0910	0,3722	0,2736	0,8840	2,2948	1,8435	0,2135
0,6242	46,5065	0,3766	0,2734	0,8873	2,2934	1,8568	0,0000
0,64	47,8170	0,3922	0,2779	0,9063	2,3162	1,9178	-1,0781
0,66	48,7420	0,4071	0,2978	0,9468	2,4161	2,0175	-3,0426
0,68	47,9590	0,4121	0,3473	1,0273	2,6809	2,2024	-6,9744
0,7	45,0826	0,4263	0,4703	1,1806	3,2990	2,9194	-26,4767
0,7045	44,8600	0,4321	0,5000	1,2080	3,4207	3,1015	-33,1633
0,72	44,4548	0,4543	0,6199	1,2991	3,8617	3,7915	-65,2819

Бұл келесі параметрлер:  $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$  (3.2 - сурет);  $\rho_m$  - өрістеги траекторияның бұрылу нүктесінің координатасы;  $\xi_m$  - айна өрісіндегі симметрия осіне траекторияның жарты проекциясы;  $l$  - тоғыстау шарттарын қанағаттандыратын көзден оның кескініне дейінгі айнаның симметрия осіне траекторияның толық проекциясына тең тоғыстық ара-қашықтық;  $D = \frac{\partial l}{\partial \varepsilon}$  - бөлшектер

шоғырындағы  $\varepsilon = \frac{\Delta \omega}{\omega}$  энергиялық шашырау шамасы бойынша көзден оның кескініне дейінгі симметрия осіне траекторияның толық проекциясын дифференциалдау арқылы анықталатын энергия бойынша салыстырмалы сызықтық дисперсия;

$A_{III} = \frac{1}{3!} \frac{d^3 l}{d \alpha^3}$  - кубтық бұрыштық аберрация коэффициенті.

3.1-кестенің мәліметтерін талдау ұсынылған айналы ГЦӨ энергия талдағышында  $P$  шағылу параметрі және  $\alpha_0$  кіру бұрышының мәндерінің кең диапазонында екінші ретті бұрыштық тоғыстау режимі іске асырылатындығын көрсетеді. Бұл жағдайда көз бен мен оның кескіні ішкі цилиндрлік электрод аймағында орналасады, яғни бұрыштық тоғыстау шарты зарядталған бөлшектердің сақиналы көзден сақиналы детекторға тоғыстау сұлбалары ( $\Delta_1 + \Delta_2 < 1$ ) үшін ғана жүзеге асырылады.

$P = 0,7045$ ,  $\alpha_0 = 44,8600$ ,  $\Delta_1 + \Delta_2 = 1$  параметрлеріне ие «сақина-ось» режимі бойынша тоғысталатын ГЦӨ талдағышының жалғыз сұлбасы практикалық қызығушылық тудырмайды. Ол үшін құрылғының аберрациясына сәйкес келетін кубтық бұрыштық аберрация коэффициенті өте үлкен мәнге ие  $\sim 33,16$  [160].

Электронды-оптикалық параметрлер бойынша ең тиімді ГЦӨ негізіндегі айналы талдағыштары  $0,52 < P < 0,64$  мәндер облысында іске асырылады, олар үшін үшінші ретті аберрациялық коэффициенттер үлкен емес.

$$\text{Үшінші ретті бұрыштық тоғыстау } \frac{dl}{d\alpha} = \frac{d^2l}{d\alpha^2} = \frac{d^3l}{d\alpha^3} = 0$$

режимін қамтамасыз ететін  $P=0,5754$  ,  $\alpha_0=40,9766$  және  $P=0,6242$  ,  $\alpha_0=46,5065$  параметрлеріне ие екі сұлба анықталған.

Бірақ келесі параметрлерге сәйкес келетін гексапольді-цилиндрлік талдағыштың электронды-оптикалық сұлбасы үлкен қызығушылық тудырады:  $P=0,6$  ,  $\alpha_0=43,742^0$  ,  $D=1,7967$  ,  $A_{III}=0,7340$  . Бұл сұлбадағы  $A_{III}$  кубтық абберация нөлге тең емес, бірақ кіші мәнге тең, сол уақытта ол  $0,52 < P < 0,64$  шағылу параметрінің мәндер аймағында максималды мәнге ие. Бұл келесі ретті  $A_{IV}$  кеңістіктік абберация коэффициентінің нөлге тең екендігін білдіреді. Бұл талдағыштың бұрыштық тоғысы идеалға жақын деген қорытынды жасауға мүмкіндік береді [161].

Айна өрісіндегі осьтік траекторияның кіру бұрышы  $\alpha_0=43,7420$  тең, траекторияның бүйір тармақтары үшін бастапқы бұрыштық шашырауы  $16^0$  ( $\Delta\alpha=8^0$ ) құрайды.

Аксиалды жазықтықтағы зарядталған бөлшектер шоғының  $16^0$  бұрыштық таралғыштығымен туындаған айналық энергия талдағышының тоғысында кескіннің көміскеленуі кубтық бұрыштық абберациямен  $\Delta l = A_{III}(\Delta\alpha)^3$  анықталады [162] және  $\Delta l=0,004$  -ге тең. Бұл ГЦӨ негізіндегі энергия талдағышы аксиалды жазықтықта үлкен бұрыштық шашыраумен зарядталған бөлшектердің күшті тоғысын қамтамасыз ете алады дегенді білдіреді. Салыстыру үшін, цилиндрлік айналы талдағышта осындай бұрыштық шашыраумен бөлшектер шоғының кескін сызығының ені  $\Delta l=0,084$  -ге тең, яғни шамамен бұл мән 20 есе үлкен.

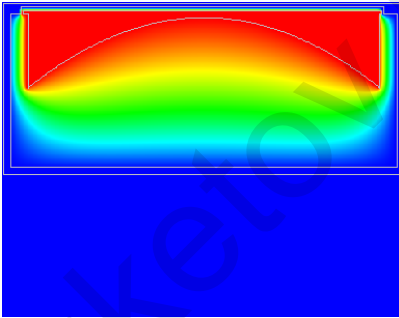
Егер  $i'$  және  $i''$  сақиналық саңылаулары тар, ал сәуленің бұрыштық таралғыштығы үлкен болса, онда талдағыштың ажырату қабілетінің өлшемі энергия бойынша меншікті дисперсиясының мәні бола алады. Бұл энергияның сызықтық

дисперсиясының айна тоғысындағы кескін сызығының еніне қатынасына тең:

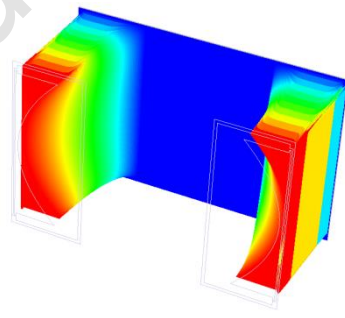
$$\delta = \frac{D}{\Delta l} = \frac{D}{A_{III} (\Delta\alpha)^3} \quad (3.25)$$

Бастапқы бұрыштық шашырауы  $16^0$  болғандағы бөлшектер үшін ГЦӨ негізіндегі энергия талдағыштың энергия бойынша меншікті дисперсия шамасы  $\delta = 449,68$  -ге тең. Бұл мән цилиндрлік айналық талдағышының меншікті дисперсиясынан шамамен 7 есе көп.

Жуық-аналитикалық әдіспен алынған есептеу нәтижелерін растау үшін,  $\mu=1$ ,  $\gamma=1$  кезінде ГЦӨ негізінде энергия талдағыштың электронды-оптикалық сұлбасының модельдеуі жүргізілген. 3.3-суретте  $\mu=1$ ,  $\gamma=1$  кезінде ГЦӨ-талдағыштағы электр өрісінің таралуы көрсетілген. 3.4-суретте электрстатикалық өріс қимасының үш өлшемді кескіні көрсетілген.



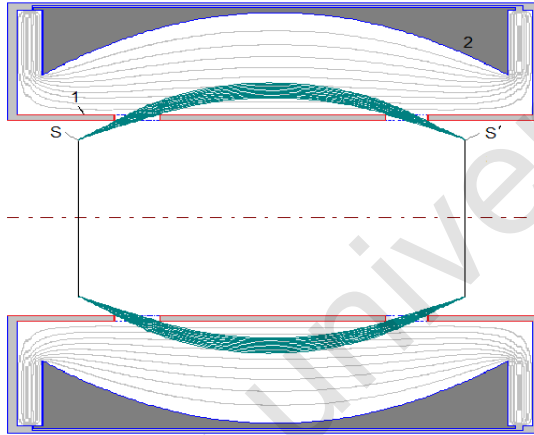
3.3-сурет.  $\mu=1$ ,  $\gamma=1$  кезінде ГЦӨ-талдағыштағы электр өрісінің таралуы



3.4-сурет. Электрстатикалық өріс қимасының үш өлшемді кескіні

3.5-суретте ұсынылған электронды-оптикалық сұлбадағы зарядталған бөлшектердің траекториясының жүрісі көрсетілген. Электронды-оптикалық жүйенің жалпы ұзындығы - 11,4. Қисықсыздықты пішінге ие (2) сыртқы электродтың потенциалы

1-ге тең. Ішкі цилиндрлік (1) электродтың радиусы 4,2 кұрайды. Ішкі цилиндрлік электродтың потенциал нөлге тең. Зарядталған бөлшек энергиясының электрод потенциалына қатынасы  $E/V=1$ . Зарядталған бөлшектер көзінің орны -  $x = 1,6$ ;  $y = 3,2$ . Бөлшектердің бастапқы шығу бұрышын өзгерту қадамы  $1^\circ$ . Барлық өлшемдер шартты бірліктермен көрсетілген.



1 - цилиндрлік электрод, 2 – қисықсызықты пішінге ие сыртқы ауытқытушы электрод, S - сақиналы көз, S' - сақиналы кескін

3.5-сурет.  $\mu = 1$ ,  $\gamma = 1$  кезінде ГЦӨ-талдағыштағы бөлшектердің қозғалыс траекториялары

3.5-суретке сәйкес, зарядталған бөлшектер  $31^\circ$ -ден  $44^\circ$ -қа дейінгі полярлық бұрыштар аралығындағы жұқа сақиналы электронды-оптикалық көзден ұшып шығып, қисықсызықты пішінді (2) сыртқы электродтағы потенциалдың әсерінен ГЦӨ-тен ауытқып, содан кейін S' сақиналы кескінге тоғысталады. S сақиналы көз және оның S' кескіні ішкі цилиндрлік электрод аймағында орналасқан. Сонымен, корпускулалы-оптикалық жүйеде «сақина-сақина» типті бұрыштық тоғыстау режимі орындалады.

3.2-кестеде «сақина-сақина» тоғыстау режиміндегі  $\mu=1$  және  $\gamma=1$  кезінде ГЦӨ-талдағышының тоғыстаушы қасиеттерінің сандық есептеу нәтижелері берілген. Тоғыстаушы қасиеттерді есептеулерден, бұл электронды-оптикалық сұлбада бөлшектердің өріске кіру бұрыштарын ( $31-44^\circ$ ) өзгертудің кең интервалы үшін орталық бұрышы  $35,7^\circ$  болатын екінші ретті бұрыштық тоғыстау режимі жүзеге асырылатыны анықталды. Бұл жүйе үшін үшінші ретті бұрыштық тоғыстау режимін қамтамасыз ететін екі сұлба анықталған:  $40,95^\circ$ -қа тең орталық тоғыстау бұрышымен  $39-42^\circ$  кіру бұрыштарының интервалында және орталық тоғыстау  $46,55^\circ$  бұрышымен  $45-48^\circ$  кіру бұрыштарының интервалында [163].

3.2-кесте.  $\mu=1$  және  $\gamma=1$  кезіндегі ГЦӨ-талдағыштың тоғыстаушы қасиеттері

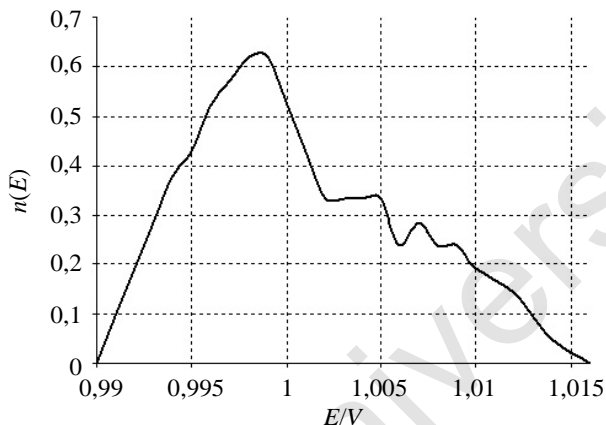
Тоғыстау реттілігі	2
Тоғыстаудың орталық бұрышы	$35,7^\circ$
Тоғыс нүктесінің $X_{\text{foc}}$ координатасы	8,9
Тоғыс нүктесінің $Y_{\text{foc}}$ координатасы	3,2
Шағылу параметрі	1

ГЦӨ-талдағыштың аппараттық функциясын есептеу үшін зарядталған бөлшектер  $31-44^\circ$  бастапқы бұрыштар диапазонында және  $0,99-1,01$  бастапқы энергиялар диапазонында сақиналы көзден ұшып шығарылады. 3.6-суретте «сақина-сақина» типті бұрыштық тоғыстау режимі үшін  $\mu=1$  и  $\gamma=1$  кезіндегі ГЦӨ-талдағыштың аппараттық функциясы көрсетілген.

Шығу диафрагмасының радиусы  $0,012 R_{\text{in}}$  болғандағы ГЦӨ – талдағыштың аппараттық функциясының жартылай биіктігіндегі салыстырмалы энергиялық ажыратуы  $1,1\%$ , ал жарық күші  $\Omega/2\pi=10\%$  құрайды. Сандық модельдеудің нәтижелері жуық-аналитикалық әдіспен алынған есептеулер мәліметтерімен жақсы үйлеседі.

Сонымен,  $\mu = 1$ ,  $\gamma = 1$  кезінде электрстатикалық ГЦӨ негізінде айналы энергия талдағышының электронды-оптикалық параметрлері есептелген. Аксиал жазықтықта бөлшектер

шоғының едәуір бұрыштық таралғыштығымен бөлшектердің траекториялары үшін бұрыштық тоғыстау шарттары анықталды.



3.6-сурет.  $\mu=1$  и  $\gamma=1$  кезіндегі ГЦӨ-талдағыштың аппараттық функциясы

Егер зарядталған бөлшектер көзі мен оның кескіні ішкі цилиндрлік электрод аймағында орналасқанда екінші және үшінші ретті бұрыштық тоғыстауды қамтамасыз ететін ГЦӨ негізінде жарық күшті энергия талдағыштарын құрастыру мүмкіндігі көрсетілген. Идеалға жақын бұрыштық тоғыстауды қамтамасыз ететін және жоғары ажырату күші және үлкен жарық күші режим жағдайында жұмыс істейтін гексапольді-цилиндрлік өріс негізінде айналы талдағышының электронды-оптикалық параметрлері анықталды. ГЦӨ-талдағыштың сандық моделі алынды, аспаптың аппараттық функциясы есептелген [164].

Сақиналы электронды-оптикалық кескіне ие бұл сұлбаны талданатын бөлшектерден оське жақын бос аймақты талап етілетін жүйе ретінде, мысалы, оже-спектрометрлерде пайдалануға болады.

### **3.3 Жұмыс көлемін шеткі өрістердің әсерінен қорғауды ұйымдастыруымен гексапольді-цилиндрлік өріс негізінде ұзынтоғысты энергия талдағышын сандық модельдеу**

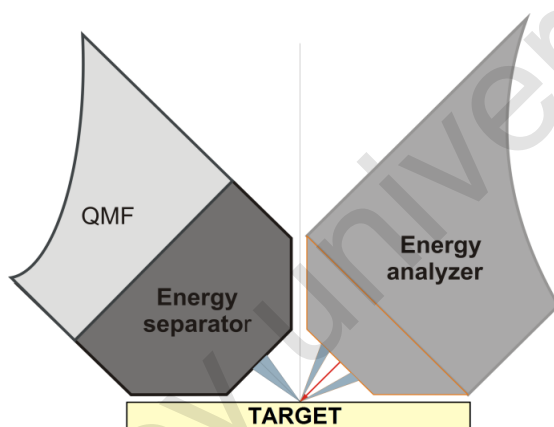
Бұл бөлім электронды спектроскопия әдісімен материалдар мен құрылымдарды локальді түрде зерттеуге арналған ұзынтоғысты жүйені құрастыруға арналған. Мұндай жүйені жасап шығарудың өзектілігі – беттің бейіндік жоғары локальді оже-талдау құралдарында, микро- және наноэлектроника аспаптарын жасап шығарудың вакуумды технологияларында қолдануға бағытталған физика-аналитикалық жабдықтау нарығында шынайы пайда болған сұраныспен байланысты.

Оже-микронд аса жоғары вакуумдық технологиялық процестердің метрологиялық жүйесі ретінде қолдануға арналған. Мысалы оже-микронд қабықшалардың өсуі, молекулалы-сәулелік эпитакия, ионды имплантация, плазмалық өңдеу және т.б. салаларда қолданылады. Ал бұл салалар өз кезекте қазіргі уақытта жаңа материалдар мен құрылымдарды, микро- және нанобъектілерді жасап шығару кезінде ең алдыңғы және тиімді болып саналады.

Технологиялық процестерге кірістірілетін диагностикалық жабдыққа қойылатын негізгі талаптар – 1) талдағыштың салыстырмалы энергиялық ажыратуы 0,5 %-дан кем болмау және 2) қоздырушы электрондар шоғының диаметрі 1 мкм. Оже-микрондқа қосымша қойылатын талаптар – кіші габариттер (конфлат CF 100 типті фланец) және негізгі технологиялық жабдықтың құнына бірнеше реттілікке кіші жоғары емес баға [165].

Екінші ретті иондық спектрометрия (ЕИМС) беттік диагностикасына жайғастырылған және бұзушы әдістерінің бірі болып табылады. Сондықтан технологияларға кірістіруші әдістеме ретінде шектелген қолданысқа ие. Бірақ практика жүзінде кейбір жағдайларда электрондық спектроскопия әдістері пайдасыз болады, ал екінші ретті масс-спектрометрия оның қамтамасыз ететін сезгіштіктің жоғары деңгейі салдарынан баламаларға ие болмайды.

Ерекше көрсетілген мәселелені келесі әдістерді үйлестіру жолымен оңай шешуге болады: 1) негізгі әдіс ретінде электрондық оже-спектроскопия (ЭОС) және 2) қосымша әдіс ретінде және сыни жағдайларда қолданылатын ЕИМС. Әдістердің кеңістіктік үйлестіру үшін «үлгі - талдағыш» үлкен ара-қашықтыққа ие болатын құралдар қажет. ЭОС және ЕИМС қамтамасыз құралдарын кеңістіктік үйлестіру есебі (3.7-сурет) және габариттерге қойылатын талаптарды ескерген жағдайда тек олардың анықталған геометриясында ғана мүмкін болады.



Energy separator – иондар энергияларының сепараторы,  
 QMF – квадрупольдік масс фильтр, Energy analyzer – кірістірілген электрондық пушкасы бар энергия талдағыш, Target – зерттелінетін үлгі (нысана)

3.7-сурет. ЭОС және ЕИМС әдістерді кеңістіктік үйлестіру

3.3-кестеде ЭОС және ЕИМС әдістердің сипаттамаларының салыстырылуы келтірілген. Кестеден көрінетіні, ЕИМС әдістердегі сезгіштік ЭОС әдістеріндегі сезгіштіктен 100-1000 артық. Ал 1-10 мкм ажырату кезінде ЕИМС әдісінің сезгіштігі жуықпен 10-4% ат. құрайды, ал бұл  $10^{16} \text{ см}^{-3}$  шоғырына сәйкес келеді. Сондықтан кіші шоғырларды зерттеу үшін тек қана ЕИМС әдістерін қолдануға болады. ЕИМС әдістің кемшілігіне бұл әдістің ЭОС әдісімен салыстырғанда бұзушы әдіс болып

табылатындығында. Сондықтан ЕИМС әдісі тек қосымша әдістің рөлін атқаруы мүмкін. Осы екі ЕИМС және ЭОС әдістерді біріктіре отырып, қатты дене тереңдігі бойынша бірінші әдістің жақсы ажыратуын және екінші әдістің аналитикалық мүмкіндіктермен үйлестіру мүмкіндігі жүзеге асырылады. Сондықтан берілген әдістерді үйлестіру зерттелінетін үлгі бетінің жоғары сезгіштікті талдауды жүргізуді қамтамасыз етеді.

3.3-кесте. ЭОС және ЕИМС әдістердің сипаттамаларын салыстыру

Әдіс	Жазықтық бойынша ажырату, мкм	Тереңдігі бойынша ажырату, нм	Сезгіштік, см <sup>-3</sup>	Әдістің артықшылығы мен кемшіліктері
ЭОС	1 - 10 <sup>2</sup>	0,6 - 5	10 <sup>17</sup> - 10 <sup>20</sup>	Бұзушы емес; Шоғырлардың үш өлшемді профилін анықтауға мүмкіндік береді; Жартылай мөлшерлі
ЕИМС	1 - 10 <sup>2</sup>	1,5 - 5	10 <sup>13</sup> - 10 <sup>19</sup>	Бұзушы; Тереңдік бойынша профилі анықтауға мүмкіндік береді; Жартылай мөлшерлі

Сонымен бетті талдаудың электронды және ионды әдістерді үйлестіру бірінші кезекте бір шағын кондырғының ішінде ЭОС және ЕИМС әдістерін үйлестіру заманауи нано- және микроэлектрондық аспаптардың жасап шығаруда технологиялық және бақылау (диагностикалық) құралдарды құрастырудағы маңызды амал-тәсіл болып саналады.

Жоғарыда атап кеткендей, негізгі шектеу – үлгіден талдағыштың шетіне дейінгі ара-қашықтық болып табылады. Бұл ара-қашықтықты шартты түрде тоғыстық ара-қашықтық деп атауға болады, талдағыштың және сепаратордың сыртқы диаметрі 80 мм болғанда ол 20 мм-ден кем болмауы тиіс. Осындай тоғыстық ара-қашықтық CF 100 фланецтерде құрылғылардың әрқайсысын

орналастыруға мүмкіндік береді. Бұл жағдайда ионды пушка келесідей орналасады: оның сәулесі зерттелінетін үлгіге қатысты кейбір бұрышпен бағытталуы керек (3.7-суреттегі энергия талдағыш пен сепаратордың орналасу жағдайына ұқсас). Эксперимент жүргізуде талдағыштың тоғысы мен оған коаксиалды түрде кірістірілетін электрондық пушканың үлгінің бетінде үйлестірілгендіктен, ол да ұзынтоғысты болуы тиіс [165, с.54].

Классикалық айналық цилиндрлік талдағыш [159] ұзын тоғысты қамтамасыз ете алмайды.

Соңғы жылдары цилиндрлік айналық энергия талдағышқа баламалы аксиалды-симметриялық энергия талдағыштардың көптеген жаңа конструкциялары ұсынылған.

Ресей ғалымдарымен ұсынылған квазиконусты энергия талдағыш [166] күмәнсіз артықшылықтарға ие (оның энергия бойынша ажырату цилиндрлік айналы талдағыштан бір реттілікке артық) болса да, «үлгі-талдағыш» кіші ара-қашықтыққа ие, сондықтан оны технологиялық қондырғыларда қолданылуы шектелген.

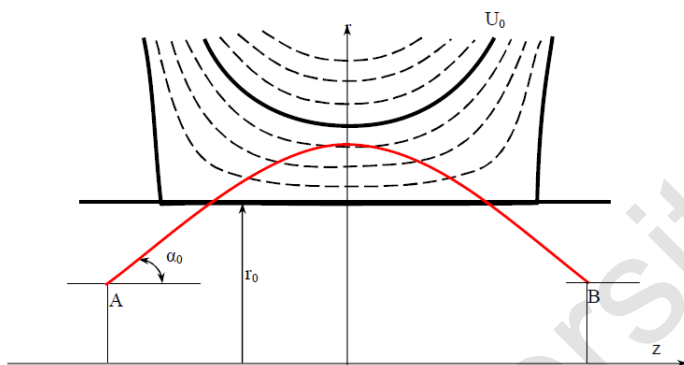
Бұл мәселенің шешілуін гексапольді-цилиндрлік өрістер негізінде құрастырылған энергия талдағыштар қамтамасыз етеді.

ГЦӨ-талдағыштағы аксиалды-симметриялы электрстатикалық айналы өріс - цилиндрлік өріс пен гексапольдің суперпозициясы болып табылады. Гексапольді-цилиндрлік энергия талдағышының электронды-оптикалық сұлбасы 3.8-суретте көрсетілген. ГЦӨ негізінде ұсынылған энергия талдағышының бойлық өлшемдері кесіктік электродтармен шектеледі, бұл өз кезекте кесіктік өрістерден қорғауды ұйымдастыруды қамтамасыз етеді.

$r, z$  координаталар жүйесінде ГЦӨ-нің потенциалы келесі өрнекпен сипатталады:

$$U(r, z) = \ln r - U_h(r, z). \quad (3.26)$$

[158, 167] жұмыстарда «сақина-ось» және «ось-ось» типті екінші ретті бұрыштық тоғыстау режимін жүзеге асыратын және кесіктік электродтарға ие ГЦӨ-талдағыштың сұлбалары жуық-аналитикалық әдіспен зерттелген. Қарастырылған тоғыс түрлері ұзын тоғысты қамтамасыз ете алмайды.



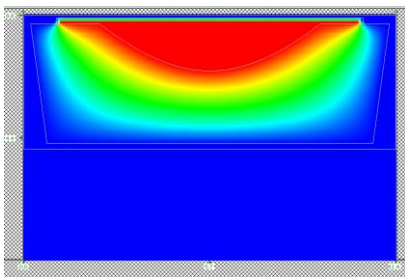
A – зарядталған бөлшектер көзі, B – қабылдағыш

3.8-сурет.  $\mu = 1, \gamma = -1$  болғанда шекті электродтарға ие ГЦӨ-талдағышының сұлбасы

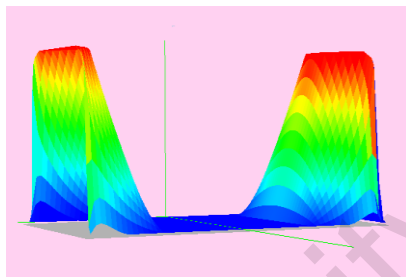
3.8-суретке сәйкес талдағыш цилиндрлік және екі кесіктік электродтардан, сондай-ақ аксиалды-симметриялы сыртқы ауытқушы электродынан құрылады, сыртқы электродтың жасаушысы өрістің эквипотенциалдарының біріне сәйкес келеді. Цилиндрлік және кесіктік электродтар нөлдік потенциал астында, ал сыртқы электродқа  $U_0$  потенциал берілген.

Зерттелетін үлгіден (нысанадан) талдағышқа дейін үлкен тоғыс ара-қашықтығын қамтамасыз ететін «ось – сақина» типті бұрыштық тоғысталу режимінде жұмыс істейтін сұлбаны іздеу мақсатында кесіктік өрістерден қорғауына ие ГЦӨ-талдағыштың модельдеуі жүргізілді. Модельдеу аксиальды-симметриялық электронды-оптикалық жүйелерді модельдеуге арналған «Фокус» сандық бағдарламасының көмегімен жүргізілді.

ГЦӨ-талдағыштағы өрісті таралу функциясы 3.9-суретте көрсетілген. 3.10-суретте айналы ГЦӨ-талдағыштың электронды-оптикалық сұлбасының электрстатикалық өріс қимасының үш өлшемді кескіні көрсетілген.



3.9-сурет. ГЦӨ-талдағыштағы өрісті таралу функциясы



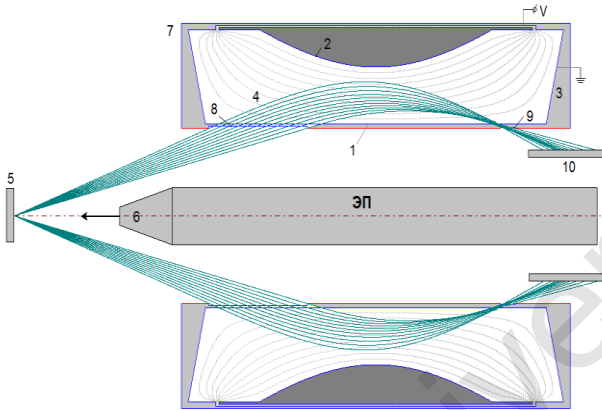
3.10-сурет. Электрстатикалық өріс қимасының үш өлшемді кескіні

3.11-суретте  $\mu=1$  және  $\gamma=-1$  кезіндегі кесіктік электродтардан құрылған гексапольдік-цилиндрлік талдағыштың электронды-оптикалық сұлбасындағы бастапқы бұрыштар  $25^0-35^0$  диапазоны үшін  $X, Y (0,0)$  координаттағы нүктелік көзден ұшып шыққан анықталған  $E/V=1,3$  энергияларға ие болатын зарядталған бөлшектер траекторияларының жиыны келтірілген.

Электронды-оптикалық сұлбаның жалпы ұзындығы - 19. Қысықсыздықты пішінге ие сыртқы (2) электродтың потенциалы 1-ге тең. Ішкі (1) цилиндрлік электродтың радиусы 4. Ішкі цилиндрлік (1) және кесіктік электродтар (3) нөлдік потенциал астында. Сыртқы электродтың (2) пішіні MathCAD бағдарламасының көмегімен алынған. Зерттелетін үлгі (5) талдағыштан  $z=4,9$  қашықтықта орналасқан. Жердің магнит өрісінің әсерін кеміту үшін талдағыш магниттік экранмен (7) қоршалған. Электрондар көзін электронды пушка атқарады, оның осі талдағыштың симметрия осіне сәйкес келеді.

3.11-суреттен көрінетіні, зерттелетін (5) үлгіден бірінші ретті сәуленумен (6) (электрондар) қоздырылған екінші ретті электрондар (4), ішкі цилиндрдегі бірөлшемді тормен тартылған арнайы кіру терезесі (8) арқылы ГЦӨ-ке кіріп, қозғалыс кезінде цилиндр осіне қарай ауытқып, цилиндрлік электродтың бетіне тоғысталады. Ішкі (1) цилиндрдегі шығу (9) терезесінің торынан өткен электрондар детектормен (10) тіркеледі. Сұлбада «ось-сақина» типті екінші ретті бұрыштық тоғыстау режимі орындалады [168]. Талдағыштағы кіру және шығу саңылаулары

зарядталған бөлшектер шоғын азимут бойынша тарататын бірөлшемді ұсақ құрылымды металл торлармен тартылады.



1 - цилиндрлік электрод, 2 – қисықсызықты пішінге ие сыртқы электрод, 3 - кесіктік электродтар, 4 – екінші ретті электрондар, 5 - зерттелетін үлгі, 6 – бірінші ретті электрондар, 7-магниттік экран, 8 және 9 – кіру және шығу саңылаулары, 10-детектор, ЭП - электронды пушка

3.11-сурет.  $\mu=1$  мен  $\gamma=-1$  кезіндегі «ось-сақина» бұрыштық тоғыстау режимін қамтамасыз ететін ұзынтоғысты ГЦӨ-талдағыштың электронды-оптикалық сұлбасы

Электронды-оптикалық сұлбаның модельдеуі зарядталған бөлшектер көзінен  $30^\circ$  градусқа жуық бұрышпен екінші ретті тоғыстауға қол жеткізу мүмкіндігін көрсетті. Бұл сұлба эмиссия бұрыштары  $30 \pm 5^\circ$  диапазонында бөлшектер ағынын детекторға дейін тиімді тасымалдауын қамтамасыз етеді және осылайша аспаптың сезгіштігін жоғарылату мәселесін шешеді.

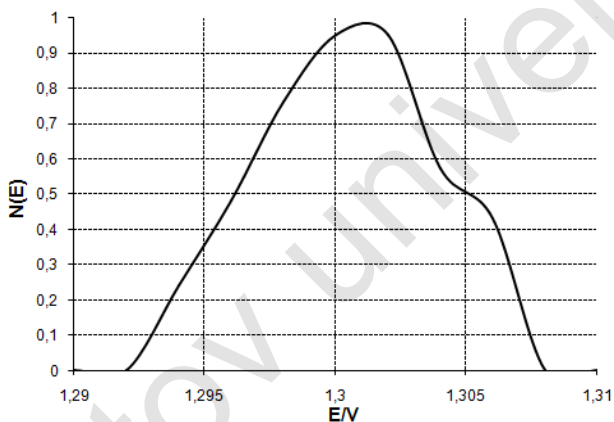
3.4-кестеде «ось-сақина» бұрыштық тоғыстау режимінде  $\mu=1$  и  $\gamma=-1$  кезіндегі ГЦӨ-нің тоғыстаушы қасиеттерін есептеу нәтижелері келтірілген.

3.12-суретте  $\mu=1$  мен  $\gamma=-1$  кезінде ГЦӨ-талдағышының аппараттық функциясы көрсетілген. Талдағыштың аппараттық функциясын есептеу кезінде бөлшектердің кіру бұрыштарының

диапазоны  $\alpha=25^0-35^0$ , ал бастапқы энергия диапазоны 1,29-1,31 құраған.

3.4-кесте.  $\mu=1$  и  $\gamma=-1$  кезінде ГЦӨ-тің тоғыстаушы қасиеттері

Тоғыстау реттілігі	2
Тоғыстаудың орталық бұрышы	$30^0$
Тоғыс нүктесінің $X_{foc}$ координатасы	14,3
Тоғыс нүктесінің $Y_{foc}$ координатасы	4
Шағылу параметрі	0,96



3.12-сурет.  $\mu=1$  мен  $\gamma=-1$  кезінде ГЦӨ-талдағышының «ось-сакина» режимі үшін аппараттық функциясы

Талдағыштың аппараттық функциясының жартылай биіктігіндегі  $\Delta E/E_0$  салыстырмалы энергиялық ажыратуы 0,3% құрайды, талдағыштың жарық күші  $\Omega/4\pi=8,71\%$ . Мұндағы  $E_0$  – өткізу функциясының максимумына сәйкес келетін энергия. Талдағыштың теориялық тұрғыдан есептелген параметрлері классикалық цилиндрлік айнаның ұқсас параметрлерімен салыстырғанда жақсығырақ.

Сандық модельдеудің нәтижелері көрсеткендей,  $\mu=1$  цилиндрлік өрістің пен  $\gamma=-1$  дөңгелектік гексапольдің суперпозициясы негізінде құрастырылған энергия талдағышы

дәстүрлі талдағыштардың түрлерімен салыстырғанда айтарлықтай артықшылықтарға ие. Жоғары жарық күші, жоғары энергия ажырату, үлкен «үлгі – талдағыш» ара-қашықтығы, сондай-ақ сыртқы қисықсыздықты электрод пішінінің есептеулерін салыстырмалы түрде оңай жүзеге асыруы ұсынылған энергия талдағышының маңызды сипаттамалары болып табылады.

Бұл сипаттамалар ұсынылған талдағышты тек электронды спектроскопияда ғана емес, сонымен қатар әр түрлі қоздыру режимдеріне ие фотоэлектрондық спектроскопияда да қолдануға мүмкіндік береді. ГЦӨ-талдағышында бойлық өлшемдерін шектейтін кесіктік электродтардың болуы шеткі өрістердің ГЦӨ-тің таралуына әсерін барынша азайтуға мүмкіндік береді [169].  $\mu=1$  мен  $\gamma=-1$  кезінде ГЦӨ негізінде ұсынылған энергия талдағышы жоғары жарық күші мен энергия ажыратуымен электрондардың таралу энергиясын өлшеуге арналған қуатты құрал болып табылады.

Сонымен, ұзынтоғысты гексапольді-цилиндрлік талдағыштың сұлбасы ұсынылады. Ұсынылған сұлбаны затты локальді талдау үшін ұзынтоғысты оже-микрондты жобалау кезінде пайдалану мүмкіндігі көрсетілген.

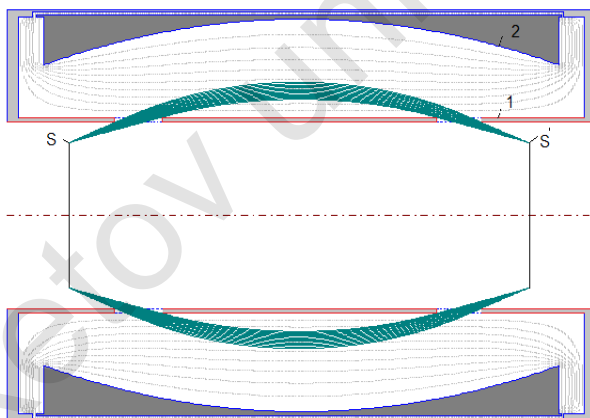
#### **3.4 $\mu = 2, \gamma = 1$ кезінде электрстатикалық гексапольді-цилиндрлік айналы энергия талдағышын сандық модельдеу**

Бұл бөлімде «Фокус» сандық бағдарламасының көмегімен  $\mu = 2, \gamma = 1$  жағдай үшін ГЦӨ негізіндегі энергия талдағыштын электронды-оптикалық сұлбасының сандық модельдеу нәтижелері келтірілген. Бұл сұлбада  $r, z$  координаттар жүйесінде ГЦӨ-тің потенциалы келесі өрнекпен сипатталады:

$$U(r, z) = 2 \ln r + U_h(r, z) \quad (3.27)$$

[134] жұмыста  $\mu = 2, \gamma = 1$  өрістің таралуы үшін жуық-аналитикалық әдіспен ГЦӨ-талдағыштын электронды-оптикалық сипаттамалары есептелді, «сақина-сақина» типті бұрыштық тоғыстау режимі анықталды.

3.13-суретте  $\mu = 2$ ,  $\gamma = 1$  кезінде ГЦӨ-талдағыштың «сақина – сақина» типті бұрыштық тоғыстау сұлбасы көрсетілген. Электронды-оптикалық жүйенің жалпы ұзындығы - 11,4. Қисықсызықты пішінге ие (2) сыртқы электродтың потенциалы 1-ге тең. Ішкі цилиндрлік (1) электродтың радиусы 4,2 құрайды. Ішкі цилиндрлік электрод нөлдік потенциал астында. Сұлбаға сәйкес (3.13-сурет) зарядталған бөлшектер полярлық бұрыштардың 31-ден 44<sup>0</sup>-қа дейінгі аралықта жұқа сақиналы электронды-оптикалық көзден ұшып, ГЦӨ-не кіру саңылауы арқылы кіріп, қисықсызықты пішінді сыртқы электродтың потенциалы әсерінен кері ауытқиды да, S' сақинаға тоғысталады. Жүйеде «сақина-сақина» типті тоғыстау режимі орындалады. Зарядталған бөлшек энергиясының электрод потенциалына қатынасы  $E/V=1$ . Зарядталған бөлшектер көзінің орны –  $x = 1,2$ ;  $y = 3,120$ . Бастапқы кіру бұрышын өзгеру қадамы 1<sup>0</sup>.



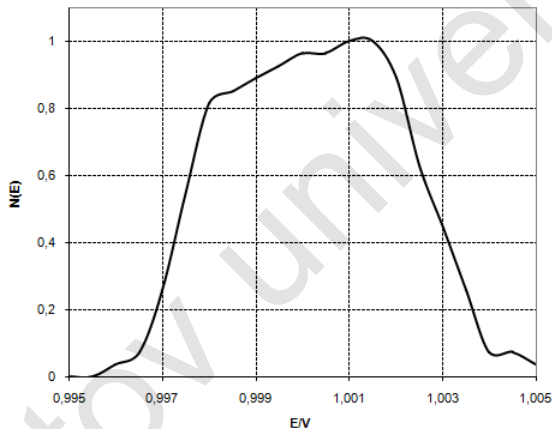
1 - цилиндрлік электрод, 2 – қисықпішінді сыртқы ауытқушы электрод,  
S - сақиналы көз, S' - сақиналы кескін

3.13 – сурет.  $\mu = 2$ ,  $\gamma = 1$  жағдай үшін ГЦӨ-талдағыштың «сақина-сақина» типті бұрыштық тоғыстау сұлбасы

«Сақина – сақина» типті бұрыштық тоғыстау режимінде ГЦӨ-талдағыштың аппараттық функциясын есептеу үшін зарядталған бөлшектер ішкі цилиндрлік электродына жақын

орналасатын электронды-оптикалық көзден  $31-44^\circ$  бастапқы бұрыштар диапазонында және  $0,995-1,005$  бастапқы энергиялар диапазонында (дәлірек  $E/V$ ) ұшырылады, мұндағы  $V$ -максималды потенциал.

3.14-суретте «сақина-сақина» типті екінші ретті бұрыштық тоғыстау режимі үшін ГЦӨ-талдағышының аппараттық функциясы көрсетілген. Шығу диафрагмасының радиусының  $0,0085R_{in}$  мәні кезінде талдағыштың аппараттық функциясының жартылай биіктігіндегі салыстырмалы энергиялық ажырату  $0,55\%$ , ал жарық күші  $\Omega/2\pi=10\%$  құрайды.



3.14-сурет.  $\mu = 2$ ,  $\gamma = 1$  жағдай үшін ГЦӨ талдағыштың аппараттық функциясы («сақина-сақина» типті бұрыштық тоғыстау режимі)

Талдағыштың электронды-оптикалық жүйесінде «ось-сақина» типті екінші ретті бұрыштық тоғыстау да орындалады. Бұл жағдайда зерттелетін үлгіден талдағышқа дейінгі арақашықтық  $z=3,6$  [170] құрайды. 3.5-кестеде  $\mu = 2$ ,  $\gamma = 1$  кезінде екінші ретті бұрыштық тоғыстау типтері үшін ГЦӨ талдағыштың тоғыстаушы қасиеттерінің есептеу нәтижелері берілген.

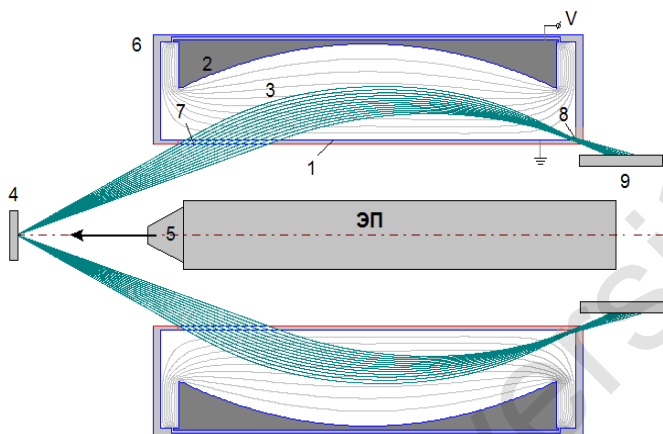
3.5-кесте.  $\mu = 2$ ,  $\gamma = 1$  жағдайы үшін екінші ретті бұрыштық тоғыстаудың әр түрлі типтері үшін ГЦӨ-талдағыштың тоғыстаушы қасиеттері

Тоғыстау типі	«Сақина-сақина»	«Ось-сақина»
Тоғыстау реттілігі	2	2
Тоғыстаудың орталық бұрышы	$34^0$	$41,37^0$
Тоғыс нүктесінің $X_{\text{фоc}}$ координатасы	10,18	15,48
Тоғыс нүктесінің $Y_{\text{фоc}}$ координатасы	3,072	3,65
Шағылу параметрі	1	1

3.15-суретте  $\mu = 2$ ,  $\gamma = 1$  кезінде ГЦӨ талдағыштың «ось – сақина» типті бұрыштық тоғыстау сұлбасы көрсетілген. Зарядталған бөлшектердің бастапқы ұшу бұрыштарының аралығы  $31-43^0$ . Зарядталған бөлшек энергиясының электродтың потенциалына қатынасы  $E/V=1,4$ . Нүктелік көзінің орналасуы –  $x = 0$ ;  $y = 0$ . Бөлшектерді енгізу бұрышының өзгеру қадамы  $1^0$ . Электрондық пушка ішкі цилиндрлік электродтың аймағында орналасқан.

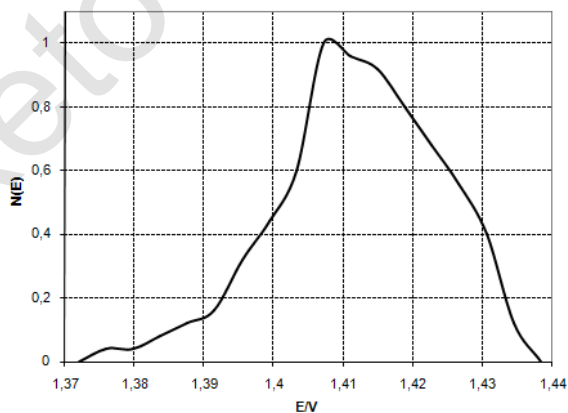
3.15-суретке сәйкес, зерттелетін (4) үлгінің бетінен бірінші ретті (5) сәулеленудің әсерінен шығарылған (3) екінші ретті электрондар кіру (7) саңылауы арқылы ГЦӨ-тің талдау аймағына түсіп, сыртқы (2) ауытқытушы электродынан шағылып, ішкі цилиндрлік (1) электродтың бетінде сақиналы кескінге тоғысталады. Содан кейін шығу (8) саңылауы арқылы өтіп, (9) детектормен тіркеледі. Кіріктірілген электронды пушкасы бар бұл сұлба зерттелетін үлгіден талдағышқа дейінгі үлкен тоғыстық ара-қашықтыққа ие.

Аппараттық функцияны есептеу үшін диафрагманы ішкі цилиндрлік электродтың бетіне орналастырылды. Зарядталған бөлшектерді енгізудің бастапқы бұрыштар диапазоны  $31-43^0$ , ал бастапқы энергиялар диапазоны (дәлірек  $E/V$ )  $1,37-1,45$ . 3.16-суретте «ось-сақина» типті бұрыштық тоғыстау жағдайы үшін ГЦӨ-талдағыштың электронды-оптикалық сұлбасының аппараттық функциясы көрсетілген.



1 - цилиндрлік электрод, 2 – қисықсызқты пішінді сыртқы электрод, 3 – екінші ретгі электрондар, 4 - зерттелетін үлгі, 5 – бірінші ретгі электрондар, 6 - магниттік экран, 7 және 8 – кіру және шығу саңылаулары, 9 - детектор, ЭП – электрондық пушка

3.15-сурет.  $\mu = 2$ ,  $\gamma = 1$  кезіндегі ГЦӨ-талдағыштағы «ось-сақина» типті бұрыштық тоғыстау сұлбасы



3.16-сурет.  $\mu = 2$ ,  $\gamma = 1$  жағдай үшін ГЦӨ-талдағыштың аппараттық функциясы («ось-сақина» типті бұрыштық тоғыстау режимі)

Шығу диафрагмасының радиусы  $0,058R_{in}$  болғандағы талдағыштың аппараттық функциясының жартылай биіктігіндегі салыстырмалы энергиялық ажырату  $0,57\%$ , ал жарық күші  $\Omega/2\pi=12,6\%$  құрайды.

Сонымен ГЦӨ-талдағыштың  $\mu = 2$ ,  $\gamma = 1$  кезінде электронды-оптикалық сұлбасының сандық моделі алынды. «Сақина-сақина», «ось-сақина» типті екінші ретті бұрыштық тоғыстау режимдері үшін талдағыштың аппараттық функциясы есептелген.

Сандық есептеулердің көмегімен «сақина-сақина», «ось-сақина» типті екінші ретті бұрыштық тоғыстау режимдері үшін ГЦӨ-талдағыштың электронды-оптикалық параметрлері анықталды. ГЦӨ негізінде екінші ретті бұрыштық тоғыстауға ие жарық күшті энергия талдағыштарын құрастыру мүмкіндігі анықталды. Ұсынылған гексапольді-цилиндрлік өрістің негізіндегі айналы талдағыш зарядталған бөлшектердің кең шоқтарының өткір тоғыстау мүмкіндігіне байланысты қолданыстағы ұқсас электронды айналармен салыстырғанда ажырату қабілетінде айтарлықтай артықшылыққа ие.

Үлкен тоғыстық ара-қашықтыққа ие «ось-сақина» типті бұрыштық тоғыстаудың іс жүзінде іске асырылатын сұлбасы оны микро- және нанометрлік масштабтардың аудандарын локальді элементтік талдауға арналған жүйеде диспергирлеуші элемент ретінде пайдалануға мүмкіндік береді.

«Ось – сақина» типті бұрыштық тоғыстау режимінде жұмыс істейтін ГЦӨ негізіндегі ұсынылған ұзынтоғысты жүйе заттарды зерттеудің баламалы физикалық әдістерінің құралдарымен тривиалды интеграциялауға мүмкіндік береді. Өзірленген жүйе талдағыштарға қойылатын талаптарды қанағаттандырады, яғни шағын габариттер және зерттелетін үлгіден талдағышқа дейінгі үлкен ара-қашықтық сияқты барлық негізгі талаптарды қанағаттандырады және микро- және наноэлектрониканың қолданыстағы және жаңа материалдарды, құрылымдар мен аспаптарды талдау және синтездеу саласындағы қолданбалы және іргелі сипаттағы өзекті ғылыми мәселелерді шешуге қабілетті.

#### 4 ЭЛЕКТРСТАТИКАЛЫҚ ДЕКАПОЛЬДІ- ЦИЛИНДРЛІК ӨРІС НЕГІЗІНДЕГІ ОСЬТІК СИММЕТРИЯЛЫҚ ЭНЕРГИЯ ТАЛДАҒЫШ

Зарядталған бөлшектердің цилиндрлік айналы энергия талдағышы конструкцияның қарапайымдылығымен үйлесетін жеткілікті жоғары электронды-оптикалық сипаттамалардың арқасында ғылыми және технологиялық мақсаттарда кеңінен қолданылады [159]. Бұл құрылғыны одан әрі жетілдірудің бір жолы - сыртқы цилиндрлік электродтың пішінін өзгерту.

Л.А. Баранованың [171-174] жұмыстар қатары бұл бағытта перспективті болып табылады, онда конструкциядағы минималды өзгерістермен жүйенің тоғыстаушы қасиеттері айтарлықтай жақсарады. Цилиндрлік айнаның модификацияланған конструкциясы ұсынылған [172, 173], конструкцияның сыртқы электроды жеке электрлік оқшауланған цилиндрлерден құрылады. Зарядталған бөлшектердің шоғырының екінші ретті тоғыстаудың «ось-ось» және «сакина-ось» режимдері зерттелген. Бұл жағдайларда талдағышқа кіре берістегі меридионалды жазықтықтағы сәуленің шашырату бұрышы бойынша 3-ші ретті сфералық абerrация коэффициентін азайту есебінен өткір тоғыстауға қол жеткізіледі.

[173] мақалада модификацияланған цилиндрлік айнадағы қос каскадты жұмыс режимін қолдану ұсынылған, мұнда зарядталған бөлшектер оптикалық осіне перпендикуляр кесіктік диафрагма арқылы ұшып кіреді. Зарядталған бөлшектер көзінің талдағыштан оптималды ара-қашықтығы  $5r_1$  –ден  $8r_1$ -ге шегінде, мұндағы  $r_1$  – ішкі цилиндрдің радиусы. Қоскаскадты талдағыштың сызықтық дисперсиясы бір каскадты құрылғының дисперсиясынан бірнеше есе жоғары екендігі көрсетілген.

Жетілдірілген цилиндрлік айналы энергия талдағыш [174] жұмыста сандық түрде зерттелді. Жетілдірілген дизайн мен [172-171-173] жұмыстарда ұсынылған цилиндрлік айнаның модификацияланған конструкциядан айырмашылығы келесіде: талдағыштың сыртқы және ішкі электродтары әрқайсысы үш оқшауланған бөлікке бөлінген, сондықтан жеке бөліктердегі потенциалдар бір-біріне тәуелсіз реттеледі. Бұл айна «ось-ось»

тоғыстау режимінде өткір тоғысты және классикалық цилиндрлік айнаның дисперсиясынан 4 есе асатын жоғары сызықтық дисперсияны сақтай отырып,  $30^0$  үлкен қармау бұрышын қамтамасыз етеді.

Мультипольді-цилиндрлік деп аталатын потенциалды өрістер қатары алғаш рет В.В. Зашкварамен және Н.Н. Тындықпен ұсынылып, жіктелген [81, 82]. Мультипольді-цилиндрлік өрістер цилиндрлік типті электрстатикалық өрістің пен әр түрлі ретті дөңгелектік мультипольдердің суперпозиция принципі бойынша құрастырылады, олардағы нөлдік эквипотенциалдық бет цилиндрлік пішінге ие. Ауытқытушы өрістерді синтездеуде мультипольдік әдіс-тәсілдерді қолдану зарядталған бөлшектер ағынын энергия бойынша талдаудың тиімді әдістерін дамытуға мүмкіндік береді.

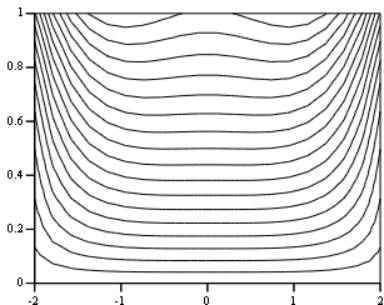
Электрстатикалық ГЦӨ-ге негізделген энергия талдағыштары жеткілікті түрде зерттелген, мысалы [134, 136] жұмыстар олардың электронды-оптикалық қасиеттері мен потенциалды мүмкіндіктері зерттеуге, сонымен бірге жоғары сапалы тоғыстау мен энергия бойынша жоғары ажырату күшіне ие болатын оптималды сұлбаларды іздеуге бағытталған.

Электрстатикалық декапольді-цилиндрлік өрістің потенциалы  $\rho, z$  координаталар жүйесінде келесі өрнекпен сипатталады:

$$U(\rho, z) = \mu \ln(1 + \rho) + \gamma U_d \quad (4.1)$$

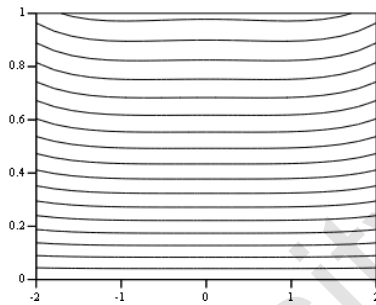
мұндағы  $\ln(1 + \rho)$  - цилиндрлік өрістің потенциалы,  $\mu$  - оның үлесін беретін коэффициент,  $U_d(\rho, z) = U_0 \rho \left( z^4 - 2\rho^2 z^2 + \frac{1}{5} \rho^4 \right)$  - дөңгелектік декапольдің потенциалы,  $\gamma$  - дөңгелектік декапольдің салмақтық үлесі.

4.1(а-г)-суреттерде цилиндрлік өрістің  $\mu$  және дөңгелектік декапольдің  $\gamma$  әр түрлі үлестеріне ие электрстатикалық декапольді-цилиндрлік өрістің эквипотенциалды суреттерінің жиыны көрсетілген. Талдағыш өрісін базалық өрістің және базалық өріске осьтес дөңгелектік мультипольдік өрістер жиынымен суперпозициялары түрінде құрастыруға болады.



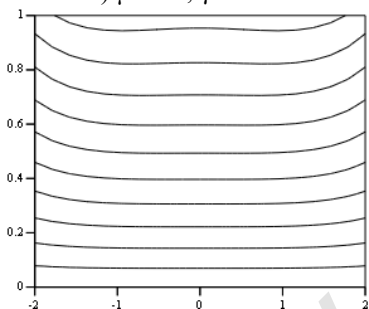
CreateMesh(R, -2, 2, 0, 1)

a)  $\mu=2.5, \gamma=-0.1$



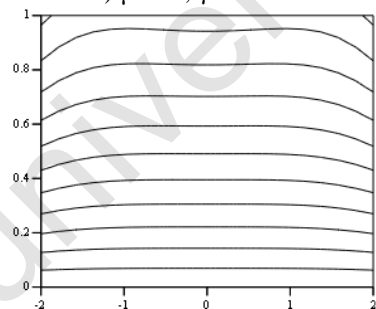
CreateMesh(R, -2, 2, 0, 1)

b)  $\mu=2.5, \gamma=-0.01$



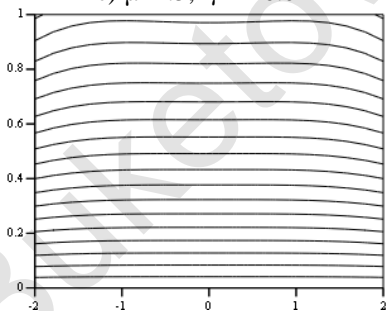
CreateMesh(R, -2, 2, 0, 1)

c)  $\mu=1.5, \gamma=-0.01$



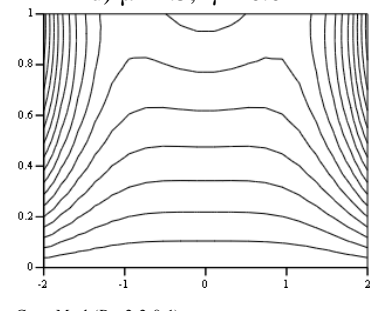
CreateMesh(R, -2, 2, 0, 1)

d)  $\mu=1.5, \gamma=0.01$



CreateMesh(R, -2, 2, 0, 1)

f)  $\mu=2, \gamma=0.01$



CreateMesh(R, -2, 2, 0, 1)

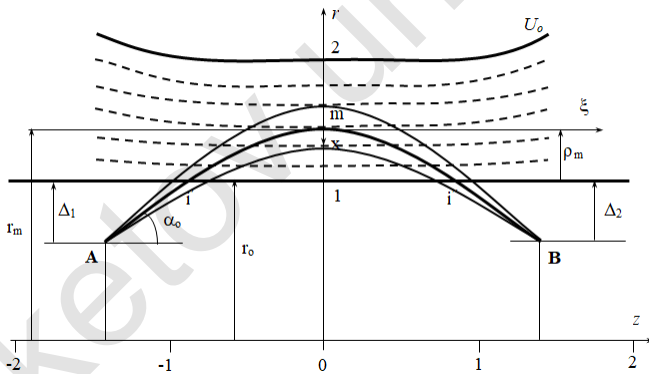
g)  $\mu=1, \gamma=0.1$

4.1-сурет. Цилиндрлік өріс пен дөңгелектік декапольдің әр түрлі үлестері кезінде электрстатикалық декапольді-цилиндрлік өрістің эквипотенциалдық суреттер жиыны

Бұл бөлімде цилиндрлік өріс пен декапольдің үлестері сәйкесті  $\mu = 3/2$  мен  $\gamma = -1/100$  тең болған кездегі декапольді-цилиндрлік айналы энергия талдағышының электронды-оптикалық сұлбасының сандық модельдеу нәтижелері келтірілген.

#### 4.1 Декапольді-цилиндрлік энергия талдағышының сұлбасының параметрлерін есептеу

Электрстатикалық декапольді-цилиндрлік өрістің эквипотенциалдық сызықтарының жиыны есептелген, онда цилиндрлік өріс пен декапольдің үлестері сәйкесінше  $\mu = 3/2$  мен  $\gamma = -1/100$  тең болды. Эквипотенциалдарды есептеулер MathCAD ортасында жүргізілді және 4.2-суретте үзік сызықтармен көрсетілген.



1 – цилиндрлік электрод, 2 – сыртқы ауытқытушы электрод,  
 А - көз,  $i'$  - кіру сақиналық саңылауы,  $i''$  - шығу сақиналық саңылауы,  
 В – қабылдағыш

4.2-сурет.  $\mu = 3/2$  және  $\gamma = -1/100$  кезіндегі декапольді-цилиндрлік өріс негізіндегі осьтік симметриялық энергия талдағышының сұлбасы

4.2-суретте цилиндрлік өріс  $\mu=3/2$  пен дөңгелек декапольдің  $\gamma = -1/100$  үлестері кезіндегі декапольді-цилиндрлік энергия талдағышының сұлбасы көрсетілген. Дөңгелектік декапольдің аз құраушысына байланысты декапольді-цилиндрлік өрістің эквипотенциалдарының таралуы түзу сызықтардан сәл ауытқуға ие және цилиндрлік өрістің эквипотенциалдарының таралуына жақын. Электрстатикалық декапольді-цилиндрлік өріс екі осьтік симметриялық коаксиалды электродтар арасындағы кеңістікте қалыптасады, олардың ішкісі (1) цилиндрлік пішініне (радиусы  $r_0$ ) ие және нөлдік потенциалдың астында, ал сыртқы қисықсызықты (ойыс) (2) электродтың пішіні декапольді-цилиндрлік өрістің эквипотенциалын қайталайды және оған  $U_0$  ауытқушы потенциал беріледі.

Зарядталған бөлшектердің траекториясын есептеудің жуық-аналитикалық әдісінің көмегімен келесі анықталды: талдағыштың геометриялық және энергиялық параметрлерінің белгілі бір қатынасы кезінде А сақиналық көзінен шыққан зарядталған бөлшектердің шоғы айна өрісімен шағылып, В сақиналық кескінінге тоғысталатыны анықталды.

Өрі қарайғы есептеулер үшін траекторияның санақ нүктесін оның  $m$  төбесіне ауыстырып, сол нүктеге координатаның  $x, \xi$  басын орналастырамыз. Бүкіл сызықтық өлшемдер ішкі цилиндрлік электродтың  $r_0$  радиусының үлестірімен өрнектеледі.

$$\frac{r}{r_0} = \frac{r_0 + r_0 \rho}{r_0} = 1 + \rho, \quad x = \rho_m - \rho, \quad \xi = \frac{z}{r_0} \quad (4.2)$$

ДЦӨ-тің (4.1) таралуы  $x, \xi$  координаталарында келесі түрге ие:

$$U_d(x, \xi) = U_0 g(x, \xi), \quad (4.3)$$

мұндағы

$$g(x, \xi) = \ln(R-x) - \frac{1}{100} \left[ \frac{(R-x-1)\xi^4 - 2(R-x-1)^3 \xi^2 + 1}{5(R-x-1)^5} \right]$$

$$R = 1 + \rho_m. \quad (4.4)$$

Зарядталған бөлшектің (4.3) өрістегі қозғалысы келесі теңдеулер жүйесімен сипатталады:

$$m \ddot{x} = qU_0 \varepsilon_1, \quad \varepsilon_1 = -\frac{\partial g(x, \xi)}{\partial x}, \quad (4.5a)$$

$$m \ddot{\xi} = qU_0 \varepsilon_2, \quad \varepsilon_2 = -\frac{\partial g(x, \xi)}{\partial \xi}. \quad (4.5b)$$

(4.5a) және (4.5b) теңдеулердің қосындысын  $\mathbf{m}$  төбесінен кез келген нүктеге дейінгі бөлшектердің траекториясы бойымен интегралдай отырып, электрстатикалық өрісте қозғалатын бөлшек үшін энергияның сақталу заңын аламыз, бұл заң бөлшектің кинетикалық энергиясының өзгерісін потенциалдар айырымымен байланысты:

$$\frac{mU_m^2}{2} - \frac{m}{2} \left( \dot{x}^2 + \dot{\xi}^2 \right) = -q(U_m - U(x, \xi)) = -qU_0(g_0 - g_x). \quad (4.6)$$

мұндағы  $U_m = U_0 g(x_m, \xi_m) = U_0 g_0$  -  $\mathbf{m}$  нүктесіндегі өрістің потенциалы, мұндағы  $x_m = \xi_m = 0$ ,  $g_x = g(x, \xi(x))$ .

$\frac{m \dot{\xi}^2}{2}$  шаманы (4.5b)-теңдеуден анықтаймыз, бұл теңдеуді  $\mathbf{m}$ -нүктесінен траекторияның кез келген нүктесіне дейін интегралдаймыз, бұл кезде  $U_m^2 = \dot{\xi}_m^2 + \dot{x}_m^2 = \dot{\xi}_m^2$  екендігін ескереміз,

себебі траекторияның ең жоғарғы нүктесінде  $\dot{x}_m = 0$ , сонымен бірге  $\dot{\xi} = \frac{d\xi}{dt} = \frac{d\xi}{dx} \frac{dx}{dt} = \xi' \dot{x}$  қатынасты қолдана отырып, келесіні аламыз:

$$\frac{mv_m^2}{2} - \frac{m\xi^2}{2} = qU_0 \int_x^{x_m} \frac{\partial g(x, \xi)}{\partial \xi} \frac{d\xi}{dx} dx = qU_0 \int_0^x \frac{\partial g(x, \xi)}{\partial \xi} \xi' d\xi \quad (4.7)$$

4.2-суретке сәйкес,  $x = \rho_m$  кезінде  $\frac{m\xi^2}{2} = W \cos^2 \alpha_0$ , сондықтан (4.7)-теңдеуді  $\frac{mv_m^2}{2}$ -ге қатысты келесідей қайта жазуға болады:

$$\frac{mv_m^2}{2} = W \cos^2 \alpha_0 + qU_0 f_m, \quad f_m = \int_0^{\rho_m} \frac{\partial g(x, \xi)}{\partial \xi} \xi' d\xi. \quad (4.8)$$

(4.7), (4.8) – теңдеулерді (4.6)-теңдеуге қойғанда, (4.3) ДЦӨ-тегі зарядталған бөлшек қозғалысының интегралды-дифференциалдық теңдеуін аламыз

$$(\xi')^2 [g_0 - g_x + f_x] = P^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha_0 + f_m - f_x, \quad (4.9)$$

мұндағы

$$g_0 = g(x_m, \xi_m) = \ln R - \frac{1}{500} (R-1)^5, \quad (4.10)$$

$$f_x = \int_0^x \frac{\partial g(x, \xi)}{\partial \xi} \xi' d\xi = \gamma \left\{ (R-x-1) \xi^4 - 2(R-x-1)^3 \xi^2 + \int_0^x \xi^4 dx - 6 \int_0^x (R-x-1)^2 \xi^2 dx \right\}, \quad (4.11)$$

және  $P_0^2 = \frac{W}{qU_0} \sin^2 \alpha_0$  - декапольді-цилиндрлік айнаның

геометриялық және энергиялық параметрлерін байланыстыратын шағылу параметрі.

(4.9) интегралды-дифференциалдық теңдеудің шешімін оны дәрежелі қатарға жіктеу түрінде іздейміз, бұл кезде қатардың белгісіз коэффициенттерін (4.9) дәрежелі қатарға қою кезінде есептелінеді. (4.9) интегро-дифференциалдық теңдеу  $x=0$  нүктесінде ерекше нүктеге ие, себебі  $(\xi')^2$  көбейткіші бұл жағдайда нөлге айналады, сондықтан теңдеуді интегралдау үшін  $\xi$  теңдеуінің шешімін бөлшектік-дәрежелі қатарға жіктеу әдісі қолданылады [81]:

$$\xi = \sqrt{x} (C_0 + C_1 x + C_2 x^2 + C_3 x^3 + C_4 x^4 + C_5 x^5 + C_6 x^6 + \dots) . \quad (4.12)$$

(4.9)-теңдеуге (4.11) бөлшектік-дәрежелі қатарды қою нәтижесінде  $C_n$  коэффициенттері анықталды:

$$C_o^2 = 4 \frac{p^2 C \operatorname{tg}(\alpha_o)^2 + f_m}{\omega} ,$$

$$\omega = \frac{1}{R} - \frac{1}{100} R^4 + \frac{1}{25} R^3 - \frac{3}{50} R^4 + \frac{1}{25} R - \frac{1}{100} , \quad (4.13)$$

$$\frac{C_1}{C_o} = \frac{1}{\omega} \left[ \left( \frac{2R - R^2 - 1}{200} \right) C_o^2 - \frac{1}{12R^2} - \frac{1}{60} R^3 + \frac{1}{20} R^2 - \frac{1}{20} R + \frac{1}{60} \right] \quad (4.14)$$

$$\frac{C_2}{C_o} = -\frac{9}{10} \left( \frac{C_1}{C_o} \right)^2 + \frac{1}{\omega} \left\{ \left[ \frac{11}{500} (2R - R^2 - 1) C_o^2 - \frac{3}{10R^2} - \frac{7}{250} R^3 + \frac{21}{250} R^2 - \frac{21}{250} R + \frac{7}{250} \right] \frac{C_1}{C_o} \right. \\ \left. + \left[ \frac{1}{3000} C_o^4 + \frac{1}{125} (R-1) C_o^2 - \frac{1}{30R^3} + \frac{7}{500} R^2 - \frac{7}{250} R + \frac{7}{500} \right] \right\}, \quad (4.15)$$

$$\frac{C_3}{C_o} = -\frac{15}{7} \frac{C_1 C_2}{C_o^2} + \frac{1}{\omega} \left[ \left[ \frac{33}{1400} (2R - R^2 - 1) C_o^2 - \frac{5}{14R^2} - \frac{9}{350} R^3 + \frac{27}{350} R^2 - \frac{27}{350} R + \frac{9}{350} \right] \frac{C_2}{C_o} + \right. \\ \left. \left[ \frac{3}{80} (2R - R^2 - 1) C_o^2 - \frac{9}{28R^2} - \frac{13}{700} R^3 + \frac{39}{700} R^2 - \frac{39}{700} R + \frac{13}{700} \right] \left( \frac{C_1}{C_o} \right)^2 + \right. \\ \left. + \left[ \frac{3}{1400} C_o^4 + \frac{23}{700} (R-1) C_o^2 - \frac{11}{350} (2R - R^2 - 1) C_o^2 - \frac{1}{7R^3} \right] \frac{C_1}{C_o} - \right. \\ \left. - \frac{1}{336} C_o^2 - \frac{1}{56R^4} - \frac{9}{1400} R + \frac{9}{1400} \right], \quad (4.16)$$

және әрі қарай  $x$  бойынша 6 реттілікке дейін анықтаймыз.

$\xi$  -ні есептеу үшін қажетті траекторияның бұрылу нүктесінің  $R = 1 + \rho_m$  радиалды құраушысын  $x = \rho_m$  нүкте үшін траекторияның (4.9) интегралды-дифференциалдық теңдеуін қолдана отырып анықтауға болады. Бұл жағдайда:  $(\xi')^2 = \text{ctg}^2 \alpha_0$   
 $g_{x=\rho_m} = 0$  және

$$g_o + f_m = P^2, \quad (4.17)$$

(4.10) теңдеуінен  $g_o$  -ді (4.16)-теңдеуге қою арқылы келесі өрнекке келеміз:

$$\ln R = P^2 - f_m + \frac{\gamma}{5} (R-1)^5, \quad (18)$$

Бұдан R шамасы тізбектей жуықтау әдісімен анықталады. Нөлдік жуықтау ретінде цилиндрлік айна талдағышының (ЦАТ) параметрлері қолданылады:

$$R_0 = \exp(P^2) = 1 + P^2 + \frac{1}{2}P^4 + \frac{1}{6}P^6 + \frac{1}{24}P^8 + \dots \text{ және } f_{m_0} = 0 \text{ [85]}.$$

Есептеу реті келесідей болады: нөлдік жуықтауды қолдана отырып,  $C_n$  коэффициенттерді анықтаймыз, содан кейін (4.17) теңдеуден тізбектей жуықтау әдісімен бірінші жуықтауда траекторияның бұрылу нүктесінің  $R_1$  радиалды координатасын табамыз, содан кейін бірінші жуықтауда  $C_n$  және  $f_{m_0}$  коэффициенттерді анықтаймыз, бірінші жуықтаудың мәліметтерін қолдана отырып, екінші жуықтауда  $R_2$  шаманы анықтаймыз және т.с.с.

Төменде 14 реттілікке дейінгі дәлдікпен айнаның P шағылу параметрінің шамасы бойынша қатарға жіктеу түрінде алынған траекторияны есептеудің соңғы нәтижелері келтірілген. Бүкіл есептеулер Mathcad Professional бағдарламалық құралы көмегімен іске асырылды.

$$\rho_m = P^2 + \frac{1}{2}P^4 + \frac{1}{6}P^6 + \frac{1}{24}P^8 + \left[ \frac{4}{75}Ctg^4(\alpha_o) - \frac{1}{50}Ctg^2(\alpha_o) + \frac{31}{3000} \right] P^{10} + \\ + \left[ \frac{17}{75}Ctg^4(\alpha_o) - \frac{59}{750}Ctg^2(\alpha_o) + \frac{151}{18000} \right] P^{12} + \dots \text{ , (4.19)}$$

Өріске кіру нүктесінен траекториясының  $m$  бұрылу нүктесіне дейінгі траекторияның айнаның симметрия өсіне  $\xi_m$  проекциясы (4.12) - (4.16) теңдеулерден  $x = \rho_m$  шарт кезінде анықталады:

$$\xi_m = \xi(x)|_{x=\rho_m} = \sqrt{\rho_m} C_o S, \text{ (4.20)}$$

мұндағы

$$C_o = Ctg\alpha_o \sqrt{4P^2 + 4P^4 + 2P^6 + \frac{2}{3}P^8 + \left(-\frac{16}{75}Ctg^2\alpha_o + \frac{43}{150}\right)P^{10} + \left(\frac{16}{75}Ctg^4\alpha_o - \frac{74}{75}Ctg^2\alpha_o + \frac{129}{250}\right)P^{12} + \dots}, \quad (4.21)$$

$$S = \left(1 + \frac{C_1}{C_o} \rho_m + \frac{C_2}{C_o} \rho_m^2 + \frac{C_3}{C_o} \rho_m^3 + \frac{C_4}{C_o} \rho_m^4 + \frac{C_5}{C_o} \rho_m^5 + \frac{C_6}{C_o} \rho_m^6\right) = 1 - 0.08333 P^2 + 0.01308 P^4 - 0.05839 P^6 + (0.00533 Ctg^4\alpha_o + 9.52 \cdot 10^{-5} Ctg^2\alpha_o - 0.11151) P^8 + (0.01308 Ctg^4\alpha_o + 0.00231 Ctg^2\alpha_o - 0.15763) P^{10} + (0.01686 Ctg^4\alpha_o + 0.00609 Ctg^2\alpha_o - 0.16554) P^{12} + \dots \quad (4.22)$$

А көзінен оның В кескініне дейінгі z симметрия осіне траекторияның толық проекциясы келесі қосынды түрінде анықталады:

$$l = \frac{L}{r_0} = 2(\Delta \operatorname{ctg}\alpha_o + \xi_m), \quad \Delta = \Delta_1 + \Delta_2 \quad (4.23)$$

мұндағы  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$  - көздің және оның кескінінің ішкі цилиндрлік электродтың бетінен алшақтығы.

*Декапольді-цилиндрлік талдағышының электрондық-оптикалық сипаттамалары.*

1, 2 және 3-ші ретгі кеңістіктік тоғыстау  $A_I = \frac{dl}{d\alpha}$   
 $A_{II} = \frac{1}{2!} \frac{d^2l}{d\alpha^2}$ ,  $A_{III} = \frac{1}{3!} \frac{d^3l}{d\alpha^3}$  коэффициенттері (4.20)-(4.23) - теңдеулерді бөлшектердің аксиалды жазықтықтағы  $\Delta\alpha$  бұрыштық шашыратудың шамасы бойынша дифференциациялау

арқылы есептелді. Екінші ретті бұрыштық тоғыстау  $\frac{dl}{d\alpha} = \frac{d^2l}{d\alpha^2} = 0$

шарттары анықталды, бұл шарттардың орындалуы кезінде кескіннің аберрациялары зарядталған бөлшектер шоғының  $\Delta\alpha_0$  бұрыштық шашыратуының кубына пропорционал болады.

Екінші ретті бұрыштық тоғыстау шарттарын қанағаттандыратын  $P$  шағылу параметріне және траекторияның  $\alpha_0$  кіру бұрышына байланысты есептелген талдағыштың негізгі электронды-оптикалық параметрлері 4.1-кестеде келтірілген:

4.1-кесте. Декапольді-цилиндрлік өрістің электронды-оптикалық сипаттамалары

№	$\alpha_0$ (град.)	$P$	$R = 1 + \rho_m$	$\xi_m$	$\Delta$	$l$	$D$	$A_{III}$
1	0.1000	30.3270	1.0101	0.0344	0.0101	0.1033	0.0693	-0.312
2	0.1500	30.7247	1.0228	0.0769	0.0228	0.2306	0.1560	-0.681
3	0.2000	31.2624	1.0408	0.1353	0.0411	0.4061	0.2779	-1.166
4	0.2500	31.9220	1.0645	0.2092	0.0653	0.6281	0.4359	-1.749
5	0.3000	32.6817	1.0942	0.2980	0.0960	0.8954	0.6320	-2.417
6	0.3500	33.5162	1.1303	0.4016	0.1342	1.2082	0.8692	-3.177
7	0.4000	34.3950	1.1736	0.5203	0.1809	1.5692	1.1527	-4.052
8	0.4500	35.2801	1.2246	0.6557	0.2381	1.9844	1.4903	-5.106
9	0.5000	36.1199	1.2844	0.8103	0.3085	2.4661	1.8939	-6.469
<b>10</b>	<b>0.5500</b>	<b>36.8346</b>	<b>1.3543</b>	<b>0.9896</b>	<b>0.3968</b>	<b>3.0386</b>	<b>2.3834</b>	<b>-8.438</b>
11	0.5954	37.2600	1.4281	1.1826	0.5000	3.8798	2.9332	-11.387
12	0.6000	37.2845	1.4362	1.2043	0.5122	3.7541	2.9964	-11.798
13	0.6100	37.3224	1.4543	1.2533	0.5400	3.9231	3.1399	-12.796
14	0.6205	37.3366	1.4740	1.3076	0.5714	4.1132	3.3005	-14.035
15	0.6300	37.3234	1.4924	1.3595	0.6021	4.2985	3.4558	-15.369
16	0.6500	37.1981	1.5336	1.4798	0.6755	4.7396	3.8213	-19.121
17	0.7000	36.0717	1.6557	1.8809	0.9438	6.3530	5.1304	-41.457
<b>18</b>	<b>0.7074</b>	<b>35.7820</b>	<b>1.6774</b>	<b>1.9588</b>	<b>1.0000</b>	<b>6.6923</b>	<b>5.4070</b>	<b>-48.150</b>
19	0.7500	33.5829	1.8384	2.5567	1.4789	9.5684	7.8919	-136.28

мұндағы  $\alpha_0$  - траекторияның кіру бұрышы;  $\Delta = \Delta_1 = \Delta_2$  - көздің және оның кескінінің ішкі цилиндрлік электрод бетінен алшақтық шамасы;  $R = 1 + \rho_m$  - траекторияның бұрылу нүктесінің координатасы,  $\xi_m$  - декапольді-цилиндрлік айнаның өрісіндегі симметрия осіне траекторияның жарты проекциясы,  $l$  - тоғыстау

шарттарын қанағаттандыратын, траекторияның көзден оның кескінге дейінгі айна симметриясының осіне толық проекциясына тең тоғыстық ара-қашықтығы,  $D = \frac{\partial l}{\partial \varepsilon}$  - бөлшектер шоғындағы

энергия шашырауының  $\varepsilon = \frac{\Delta \omega}{\omega}$  шамасы бойынша (4.20)-теңдеуді

дифференциалдау арқылы анықталатын энергия бойынша салыстырмалы сызықтық дисперсиясы,  $A_{III} = \frac{1}{3!} \frac{d^3 l}{d \alpha^3}$  - кубтық

бұрыштық аберрация коэффициенті.

4.1-кестенің мәліметтерінен көрінетіні, ДЦӨ-ке негізделген айналы энергия талдағышында зарядталған бөлшектер сақиналы көзден сақиналы детекторға тоғыстау сұлбалары үшін екінші ретті бұрыштық тоғыстау шарты  $P$  және  $\alpha_0$  параметрілері мәндерінің үлкен диапазонында жүзеге асырылады, себебі  $\Delta_1 + \Delta_2 < 1$ .  $P=0,7074$ ,  $\alpha_0=35,7820$ ,  $\Delta_1 = \Delta_2 = 1$  параметрлерге ие «ось-ось» сұлбасы бойынша тоғыстайтын ДЦӨ-талдағышының жалғыз сұлбасы практикалық қызығушылық тудырмайды, себебі аспап кескінінің аберрациясына пропорционал кубтық бұрыштық аберрация коэффициенті, өте үлкен мәнге тең  $A_{III} \sim -48,150$ .

Электронды-оптикалық сипаттамалары бойынша ең оптималды ДЦӨ-талдағыштары  $0,40 < P < 0,60$  мәндер аймағында орналасқан, бұл жағдайда үшінші ретті аберрациялық коэффициенттер кіші мәнге тең, олардың мәндері белгілі цилиндрлік айнаның кубтық бұрыштық аберрациясынан 2-3 есе кем [85]. 4.2-суретте көрсетілген айналы декаполь-цилиндрлік талдағыштың сұлбасы келесі электронды-оптикалық сипаттамаларға сәйкес келеді: декапольді-цилиндрлік айнаның геометриялық және энергиялық параметрлерін байланыстыратын шағылу параметрі  $P=0,55$ , осьтік траекторияның айна өрісіне кіру бұрышы  $\alpha_0 = 36,8346^0$ , бүйірлік тармақтары үшін бастапқы бұрыштық шашырау  $12^0$  ( $\Delta \alpha = \alpha - \alpha_0 = \pm 6$ ). Бөлшектер шоғының бастапқы бұрыштық шашыратуынан туындаған гаусс тоғысының маңындағы кескін сызығының ені траекторияларды есептеудің

сандық әдісін қолдана отырып анықталды және  $12^\circ$  бұрышы үшін  $\Delta l = l(\alpha) - l(\alpha_0) = 0,0076$  шамасын құрады. Цилиндрлік айналы талдағыштағы осындай бұрыштық шашырауы кезінде бөлшектер шоғының кескін сызығының ені шамамен 5 есе үлкен:  $\Delta l = 0,036$  [85].

Бастапқы бұрыштық шашырауы  $12^\circ$  болғандағы бөлшектер үшін есептелген ДЦӨ-талдағышының ажырату қабілеттілігін сипаттайтын энергия бойынша меншікті дисперсиясының мәні

$$\delta = \frac{D}{\Delta l} = 313,6 \text{ құрайды. Бұл мән цилиндрлік айналы талдағышының меншікті дисперсия шамасынан екі есе артық } \Delta L(\pm 6) = 0,036, \delta = \frac{D}{\Delta L(\pm 6)} = \frac{5,6}{0,036} = 155,6 \text{ [85].}$$

Сонымен, электрстатикалық декапольді-цилиндрлік өріс негізіндегі ұсынылған айналы талдағыш жоғары ажырату және жоғары жарық күші режимінде жұмыс істей алады, бұл режим осьтік симметриялық айнаның кеңістіктік тоғыстау қасиетін және аксиалды жазықтықта кең шоқтардың өткір тоғыстау мүмкіндігін қамтамасыз етеді.

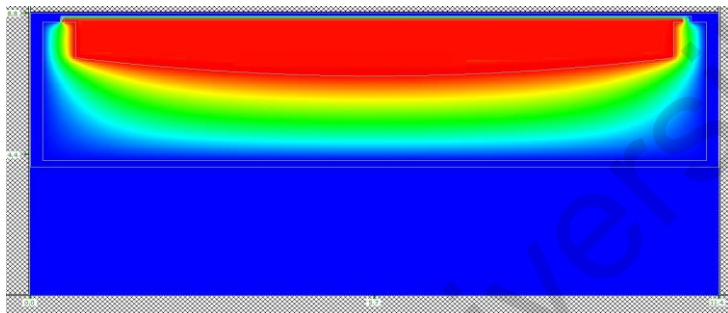
Ұсынылған энергия талдағышын жуық-аналитикалық әдіспен есептеу сандық модельдеумен толықтырылған, сандық модельдеу берілген сұлбадағы «ось-сақина» типті тоғыстау режимін растады.

#### **4.2 Декапольді-цилиндрлік энергия талдағышының электронды-оптикалық сұлбасын сандық модельдеу**

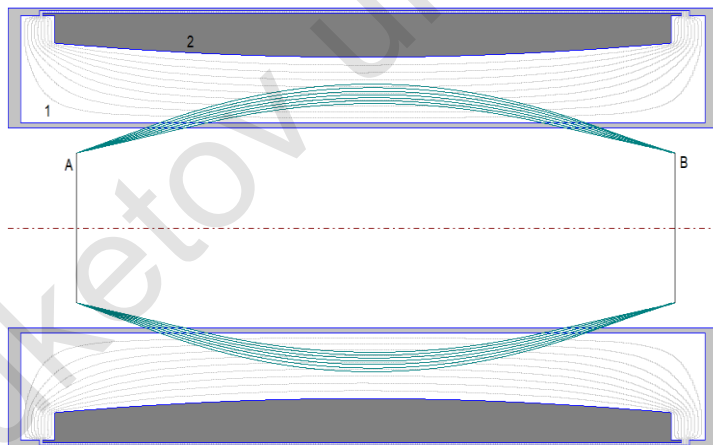
$\mu = 3/2$  мен  $\gamma = -1/100$  өріс таралуы үшін декапольді-цилиндрлік энергия талдағышының электронды-оптикалық сұлбасының сандық модельдеуі жүргізілді. Декапольді-цилиндрлік энергия талдағышының электронды-оптикалық сұлбасының сандық модельдеуі электрондық және иондық оптика құрылғыларды автоматтандырылған жобалау үшін «Фокус» бағдарламасының көмегімен іске асырылды.

4.3-суретте ДЦӨ-талдағыштағы электр өрісінің таралуы көрсетілген. 4.4-суретте сақиналы көзі мен кескінге ие декаполь-

цилиндрлік өріс негізіндегі энергия талдағыш сұлбасындағы электрондардың траекториялары көрсетілген.



4.3-сурет. ДЦӨ-талдағыштағы электр өрісінің таралуы



А-жұқа сақиналық көзі, В – сақиналық кескін,  
1 - цилиндрлік электрод, 2 - сыртқы ауытқытушы электрод

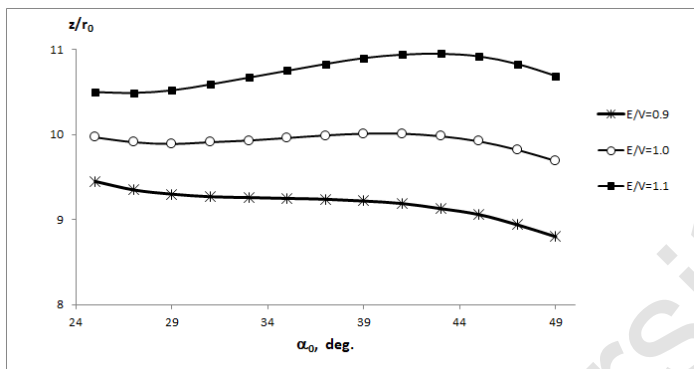
4.4-сурет. Декапольді-цилиндрлік өріс негізіндегі энергия талдағыш сұлбасындағы электрондардың траекториялары («сақина-сақина" түріндегі тоғыстау режимі»)

Электронды-оптикалық сұлбаның ұзындығы - 11,4. Сыртқы (2) ойыс электродтың потенциалы 1-ге тең. Ішкі (1) цилиндрлік электродтың радиусы 4,2 құрайды. Ішкі цилиндрлік электрод нөлдік потенциал астында. Электронның энергиясының сыртқы электродтың потенциалына қатынасы  $E/U=1,3E[\text{эВ}]/U[\text{В}]=1,3$  құрайды. Бүкіл өлшемдер шартты бірліктерінде өрнектелген.

Сақиналы көз бен сақиналы кескін көбінесе конструктивті себептерге байланысты маңызды және қажетті болып саналады. Сақиналы электронды-оптикалық көз (мысалы, үлкен аудан үлгісінен бөлшектер ағынымен сәулелендірілген сақиналы диафрагма) электрондарды рентген сәулесімен қоздыру кезінде, растрлық микроскопияда және т.б. қолданылады [157].

4.4-суретке сәйкес жұқа сақиналы А көзден ұшып шыққан электрондар шоғы айна өрісімен шағылып, кейін В сақиналы кескініне тоғысталады. А сақиналы көз бен оның В кескіні ішкі цилиндр облысында орналасқан. Сонымен, сұлбада «сақина-сақина» типті бұрыштық тоғыстау режимі орындалады. Сандық есептеулерден берілген электронды-оптикалық сұлбада кіріс бұрыштарын (  $30 - 42^{\circ}$  ) өзгертудің кең аралығы үшін  $34,8^{\circ}$  орталық бұрышпен екінші ретті бұрыштық тоғыстау режимі жүзеге асырылатыны анықталды.

4.5-суретте зарядталған бөлшек энергиясының әр түрлі мәндері кезінде «сақина-сақина» типті бұрыштық тоғыстау режимі үшін бөлшектің ұшып келу нүктесінің өріске  $\alpha_0$  кіру бұрышына тәуелділігі көрсетілген.

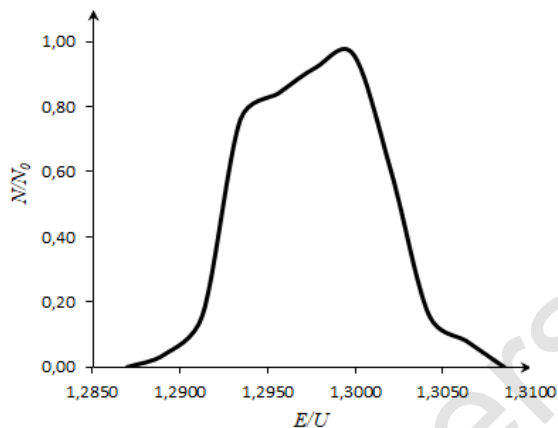


4.5-сурет. Бөлшектің ұшып келу нүктесінің өріске  $\alpha_0$  кіру бұрышына тәуелділігі

4.4-суреттен бөлшектердің өріске кіру бұрыштарының оптималды диапазоны  $30^0-42^0$  бұрыштар интервалы екендігін көруге болады, бұл кезде  $\Omega=12\%$  жоғары жарық күші және бөлшектер шоғының жақсы тоғысталуы қамтамасыз етіледі.

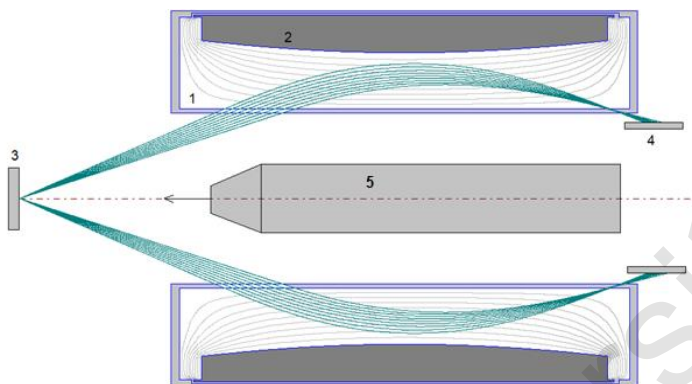
Траекториялық талдау нәтижелері бойынша энергия талдағыштың энергиялық ажыратуын бағалау үшін аппараттық функция есептеп алынды. 4.6-суретте «сақина-сақина» типті бұрыштық тоғыстау режимі үшін ұсынылған аспаптың аппараттық функциясы көрсетілген, аспап жарық күші  $\Omega/2\pi=12,3\%$  болғанда аспап  $R=0,8\%$  салыстырмалы энергиялық ажыратуды қамтамасыз етеді.

Сонымен сақиналы электронды-оптикалық кескінге ие берілген сұлбаны оське жақын талданатын бөлшектерден бос аймақ қажет ететін жүйе ретінде пайдалануға болады, мысалы, оже немесе рентген – электрондық спектрометрлерде.



4.6-сурет. ДЦӨ-талдағышының аппараттық функциясы («сақина – сақина» типті бұрыштық тоғыстау режимі)

4.7-суретте декапольді-цилиндрлік энергия талдағышының электронды-оптикалық сұлбасындағы электрондардың траекториялар жиынтығы көрсетілген, бұл режимде нүктелік көз энергия талдағыштан үлкен ара-қашықтықта симметрия осінде орналасқан. Электрондар энергиясының ауытқытушы электродының потенциалына қатынасы  $E/U=1,64E[\text{эВ}]/U[\text{В}]=1,64$  құрайды. Электрондарды энергия талдағыш өрісіне енгізу бұрышының аралығы  $32^\circ - 40^\circ$ . Зерттелетін үлгіден энергия талдағышқа дейінгі ара-қашықтық  $z = 3,7$ .



1 - цилиндрлік электрод, 2 - сыртқы ауытқытушы электрод, 3-нүктелік көзі бар зерттелетін үлгі, 4-детектор, 5 - электронды пушка

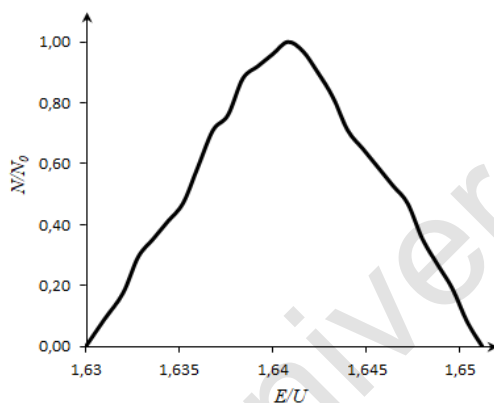
4.7-сурет. Декапольді-цилиндрлік өрісіне ие энергия талдағыш сұлбасындағы электрондардың траекториялары («ось-сакина» типті тоғыстау режимі)»

4.7-суретке сәйкес бірінші ретті сәулеленудің әсерінен зерттелетін (3) үлгінің бетінен шыққан екінші ретті электрондар талдағыш өрісіне кіріп, сыртқы ауытқытушы (2) электродтан н шағылғаннан кейін цилиндрлік (1) электродтың бетінде сақиналы кескінге тоғысталады. Жүйені модельдеу зарядталған бөлшектер көзінен  $36,8^{\circ}$  жақын шығу бұрышы кезінде екінші ретті тоғыстауға қол жеткізу мүмкіндігін көрсетті. Сұлбада «ось-сакина» типті екінші ретті бұрыштық тоғыстау режимі орындалады.

«Ось-сакина» типті тоғыстау режиміне ие бұл сұлба «үлгі – талдағыш» үлкен тоғыстық ұзындығын қамтамасыз етеді және коаксиалды кіріктірілген электронды пушкадан құрылады. Себебі энергия талдағыштың тоғысы және оған коаксиалды кірістірілген электрондық пушка эксперимент жүргізу кезінде зерттелетін үлгінің бетінде біріктіріледі, сондықтан пушканың өзі ұзынтоғысты болуы қажет.

4.8-суретте «ось-сакина» типті бұрыштық тоғыстау режимі үшін декапольді-цилиндрлік энергия талдағышының аппараттық

функциясы көрсетілген. Аспаптың аппараттық функциясының жартылай биіктігіндегі салыстырмалы энергиялық ажыратуы 0,74% - ды құрайтыны анықталды. Аспаптың жарық күші  $\Omega/2\pi=8,2\%$ .



4.8-сурет. ДЦӨ-талдағышының аппараттық функциясы («ось-сақина» типті бұрыштық тоғыстау режимі)

Ұсынылған декапольді-цилиндрлік энергия талдағышы және модификацияланған және жетілдірілген айналармен салыстырмалы талдау ([171] және [174] еңбектерінде келтірілген кестелер) келесіні көрсетті: барлық жүйелер зарядталған бөлшектердің шоқтарының екінші ретті тоғыстау режимдерін жүзеге асырады, декапольді-цилиндрлік энергия талдағыштың ажыратуы сәл кемірек, бірақ бірқатар басқа артықшылықтарға ие.

«Ось-сақина» тоғыстау режимін іске асыратын энергия талдағыш сұлбасының артықшылығы үлкен «үлгі – талдағыш» тоғыстық ара-қашықтығы болып табылады, бұл өз кезекте әр түрлі әдістерді кеңістіктік біріктіруге мүмкіндік береді, мысалы, оже-микрозондты қатты дененің бетін зерттеудің балама әдістерінің құралдарымен [167]. Ұсынылған энергия талдағышы жоғары жарық күші мен ажыратуға ие, қосымша қуат жүйесін қажет етпейді, ықшамды және бөлшектердің тоғыстау сапасы төмен емес.

Үлкен тоғыстық ара-қашықтықты қамтамасыз ететін «ось-сақина» типті бұрыштық тоғыстау режиміне ие энергия талдағышының сұлбасын микро- және нанометрлік масштабтағы материалдарды элементтік талдаудың негізгі құралы ретінде электрондық оже-спектрометрлерде диспергирлеуші элементі ретінде пайдалануға болады.

Сонымен жұмыста цилиндрлік өріс пен декапольдің үлестері сәйкесінше  $\mu = 3/2$  мен  $\gamma = -1/100$  құрайтын осьтік симметриялық декапольді-цилиндрлік энергия талдағышы сұлбасының сандық модельдеуі жүргізілген [175]. Бұрыштық тоғыстаудың екі режимі үшін электрстатикалық декапольді-цилиндрлік өріске негізделген энергия талдағышының сұлбаларының сандық модельдері алынды. Бөлшектердің қозғалыстарына траекториялық талдау жүргізілді. Екі тоғыстау режимдері үшін сұлбаның аппараттық функциялары есептелген. Кірістірілген электрондық пушкамен толықтырылған декапольді-цилиндрлік өріске негізделген ұзын тоғысты энергия талдағышының сұлбасы электронды оже-спектроскопия әдісімен материалдар мен құрылымдарды локальді зерттеу үшін қолдануға болатындығы атап өтілді.

## Қорытынды

Монографияда зарядталған бөлшектер ағындарының энергияларын талдауға арналған жоғары тиімді корпускулалы-оптикалық жүйелерді есептеу және модельдеу нәтижелері келтірілген.

Модификацияланған электрстатикалық өріске ие айна негізінде талдаушы жүйенің электрондық-оптикалық қасиеттерін теориялық зерттеу жүргізілген. Бөлшектерінің траекториясының көзден кескінге дейін оське толық проекциясының теңдеуі алынды. Біртекті емес өріске ие электронды-оптикалық айнарлардың абберрациялық көмескілеу функциялары есептелген. Біртекті емес өріс негізіндегі талдағыш сұлбасының анықталған ең оптималды нұсқасы жазық айнаға қарағанда жоғары ажырату қабілетіне ие. Біртекті емес өріс негізіндегі жазық симметриялық айналы энергия талдағышының электронды-оптикалық сұлбасын сандық модельдеудің нәтижелері келтірілген. Ұсынылған жазықсимметриялық электронды-оптикалық жүйе зарядталған бөлшектердің таралуын жоғары ажырату қабілеттілігімен энергия бойынша талдауға мүмкіндік береді. Сұлба орталық бұрышы  $30^\circ$  болатын екінші ретгі бөлшектердің шоқтарының бұрыштық тоғыстау режимін қамтамасыз етеді.

Жоғары сапалы бұрыштық тоғыстауға және цилиндрлік өріс пен гексапольдің әр түрлі үлестеріне ие болатын гексапольді-цилиндрлік өрістер негізіндегі энергия талдағыштарының электронды-оптикалық сұлбаларының сандық модельдеуі жүргізілген. Жоғары ажырату мен үлкен жарық күші жағдайында жұмыс режимін қамтамасыз ететін, бұрыштық тоғыстауы идеалды тоғыстауға жақын болатын энергия талдағыш жуықтау-аналитикалық әдіспен алғаш рет есептелінген. Электрондық оже-спектроскопия мен екінші ретгі-ионды масс-спектрометрия әдістерінің кеңістіктік үйлесуі кезінде «үлгі-талдағыш» үлкен ара-қашықтыққа ие болатын құралдар қажет. Ұзынтоғысты гексапольді-цилиндрлік талдағыштардың сұлбалары ұсынылған. Заттың жергілікті талдауы үшін ұзынтоғысты оже-микрозондты жобалау кезінде олардың қолданылу мүмкіндігі алғаш рет көрсетілген.

Декапольді-цилиндрлік энергия талдағышының электронды-оптикалық сұлбасының сандық модельдеуі жүргізілді. Электрстатикалық декапольді-цилиндрлік өріс негізіндегі ұсынылған айналы талдағыш жоғары ажырату және жоғары жарық күші режимінде жұмыс істей алады, бұл режим осьтік симметриялық айнаның кеңістіктік тоғыстау қасиетін және аксиалды жазықтықта кең шоқтардың өткір тоғыстау мүмкіндігін қамтамасыз етеді. Ұсынылған энергия талдағышын жуық-аналитикалық әдіспен есептеу сандық модельдеумен толықтырылған, сандық модельдеу берілген сұлбадағы «ось-сақина» типті тоғыстау режимін растады. Бұрыштық тоғыстаудың екі режимі үшін электрстатикалық декапольді-цилиндрлік өріске негізделген энергия талдағышының сұлбаларының сандық модельдері алынды. Бөлшектердің қозғалыстарына траекториялық талдау жүргізілді. Екі тоғыстау режимдері үшін сұлбаның аппараттық функциялары есептелген. Кірістірілген электрондық пушкамен толықтырылған декапольді-цилиндрлік өріске негізделген ұзын тоғысты энергия талдағышының сұлбасы электронды оже-спектроскопия әдісімен материалдар мен құрылымдарды локальді зерттеу үшін қолдануға болатындығы атап өтілді.

## Қолданылған әдебиеттер тізімі

- 1 Углов В.В., Черенда Н.Н., Анищик В.М. Методы анализа элементного состава поверхностных слоев. - Мн.: БГУ, 2007. - 158 с.
- 2 Вудраф Д., Делчар Т. Современные методы исследования поверхности. - М.: Мир, 1989. - 568 с.
- 3 Зигбан К., Нордлинг Т., Фальман А., Нордберг Р. Электронная спектроскопия. - М.: Мир, 1971. - 493 с.
- 4 Силады М. Электронная и ионная оптика. - М.: Мир, 1990. - 639 с.
- 5 Глазер В. Основы электронной оптики. - М.: Гос.изд.техн.-теор. литературы, 1957. - 763 с.
- 6 Козлов И.Г. Методы энергетического анализа электронных потоков. - М.: Атомиздат, 1971. - 189 с.
- 7 Кульментьев А.И., Кульментьева О.П. Методы анализа поверхности твердых тел. - Сумы: СумГУ, 2008. - 158 с.
- 8 Афанасьев В.П. Электронная и ионная спектроскопия твердых тел // Соросовский Образовательный Журнал. - 1999. - Т. 5, № 2. - С.110-116.
- 9 Афанасьев В.П., Явор С.Я. Электростатические энергоанализаторы для пучков заряженных частиц. - М.: Наука, 1978. - 224 с.
- 10 Hamada Y., Fujisawa A., Iguchi H., Nishizawa A., Kawasumi Y. A tandem parallel plate analyzer // Rev. Sci. Instrum. - 1997. - Vol. 68, № 5. - P. 2020-2022.
- 11 Boumsellek S., Tuan V.N., Esaulov V.A. Electrostatic analyzer and optics for low - energy electron spectroscopy // Rev. Sci. Instrum. - 1990. - Vol. 61, № 7. - P. 1854-1857.
- 12 Yuan D., Kuo T., Cojocar G., Jayamanna K., McDonald M., Schmor P., Yin Y. Design of a parallel-plate energy spread analyzer // Rev. Sci. Instrum. - 1998. - Vol.69, № 2. - P. 1194-1196.
- 13 Calabrese D., Yenen O., Wiese L.M, Jaecks D. H. Two-stage parallel-plate energy analyzer for simultaneous detection of positive, negative, and neutral particles // Rev. Sci. Instrum. - 1994. - Vol. 65, № 1. - P. 116-122.

- 14 Фишкова Т.Я. Система монохроматизации электронного пучка // Прикладная физика. - 2011. - №2. - С.33-36.
- 15 Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я., Шпак Е.В. Цилиндрическое зеркало с закрытыми торцами для анализа по энергии вторичных пучков заряженных частиц со сканированием поверхности образца // Письма в ЖТФ. – 1995. - Т.21, вып.21. - С. 19-22.
- 16 Трубицын А.А. Новый электростатический анализатор с угловым и энергетическим разрешением//Письма в ЖТФ. - 1995. - Т.21, вып.13. - С.19-22.
- 17 Zashkvara V.V., Ashimbaeva B.U. Cylindrical mirror analyzer with adjustable angular focusing // J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. – 1998. - Vol. 94, is.1-2. – P.89-96.
- 18 Yi-sha Ku, Ching-shen Su. Design and performance of a cylindrical reflection mirror analyzer for low energy ion scattering studies // Rev.Sci.Instrum. -1991. - Vol.62, № 6. - P.1471-1474.
- 19 Read F.H., Cubric D., Kumashiro S., Walker A. The parallel cylindrical mirror analyzer: axis-to-axis configuration // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2004. - № A 519. – P. 338–344.
- 20 Zou Y., Cui Y., Yun V., Valfells A. and other. Compact high-resolution retarding field energy analyzer for space-charge-dominated electron beams // Phys.rev.special topics - accelerators and beams. – 2002. – Vol. 5, № 072801. - P.1-7.
- 21 Tokesi K., Kover L., Varga D. A modified distorted field electrostatic analyzer // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. - 1994. - № A 348. - P.173-176.
- 22 Овсянникова Л. П., Фишкова Т. Я. Электростатический энергофильтр с двойной фокусировкой // Прикладная физика. – 2008. - №5. - С.86-88.
- 23 Bundaleski N., Rakocevic Z., Terzic I. Optical properties of the  $127^{\circ}$  cylindrical energy analyzer used in LEIS experiments // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. - 2002. - № B 198. - P. 208-219.
- 24 Iwamoto K., Matsumoto A. Ion energy loss spectroscopic apparatus using cylindrical electrostatic energy analyzer equipped

with the Matsuda plate // Rev. Sci. Instrum. - 1997. - Vol. 68, № 8. - P. 3042-3045.

25 Fujisawa A., Iguchi H., Sasao M., Hamada Y. Second-order focusing property of  $210^0$  cylindrical energy analyzer // Rev. Sci. Instrum. - 1995. - Vol. 66, № 3. - P. 2524- 2527.

26 Williams J.F., Chen X., Wilkie P. Miniature electrostatic electron energy analyzers and S-shaped deflector // Rev.Sci.Instrum. - 2008. - Vol 79, № 023104. - P.1-4.

27 Ishii K., Ohkawara H., Maeda Y., Katanuma I., Yatsu K., Miyoshi S. The energy component analyzer and spectrum analysis of end-loss ions in a tandem mirror // Rev. Sci. Instrum. - 1991. - Vol. 62, № 4. - P.899-905.

28 Read F.H. The parallel cylindrical mirror electron energy analyzer // Rev. Sci. Instrum. - 2002. - Vol. 73, № 3. - P. 1129-1139.

29 Rubio-Zuazo J., Escher M., Merkel M., Castro G.R. High Voltage-Cylinder Sector Analyzer 300/15: A cylindrical sector analyzer for electron kinetic energies up to 15 keV // Rev. Sci. Instrum. - 2010. - Vol. 81, № 043304. - P. 1-8.

30 Varga D., Tokesi K., Rajta I. Design of an electrostatic electron spectrometer for simultaneous energy and angular distribution measurements // J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. - 1995. - Vol. 76. - P. 433- 436.

31 Teodorescu C. M., Gravel D., Ruhl E. and other. Retractable miniature double pass cylindrical mirror analyzers// Rev. Sci. Instrum. - 1998. - Vol. 69, № 11. - P. 3805-3808.

32 Petrov V.N., Kamochkin A.S. Energy analyzer for spin polarized Auger electron spectroscopy // Rev. Sci. Instrum. - 2004. - Vol. 75, № 5. - P. 1274-1279.

33 Kobayashi E., Seo J., Nambu A., Mase K. Development of a miniature double-pass cylindrical mirror electron energy analyzer (DPCMA), and its application to Auger photoelectron coincidence spectroscopy (APECS) // Surface Science. - 2007. - Vol. 601. - P. 3589-3592.

34 Koscielniak P., Kaszczyszyn S., Szuber J. A new type of electron energy analyzer based on three coaxial cylindrical electrodes for Auger electron spectroscopy // Vacuum. - 2001. - Vol. 63. - P.361-66.

- 35 Dogan M., Sise O., Ulu M.. Design of electron energy analyzers for electron impact studies // *Radiation Physics and Chemistry*. – 2007. – Vol. 76. – P. 445–449.
- 36 Давыдов С.Н., Данилов М.М., Кораблев В.В. Сферическое зеркало как инструмент для электронной спектроскопии совпадений // *ЖТФ*. – 1999. - Т.69, вып.1. - С.109-113.
- 37 Berntsen M.H., Palmgren P., Leandersson M. and other. A spin- and angle-resolving photoelectron spectrometer// *Rev. Sci. Instrum.* – 2010. – Vol. 81, №035104. - P. 1-5.
- 38 Belov V.D., Yavor M.I. High-resolution energy analyzer for photoelectron diffraction studies // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. – 2007. -№ A 575. – P. 262–265.
- 39 Baraldi A., Dhanak V.R. Design study of a double pass hemispherical electron energy analyser with multichannel detection // *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* - 1994. - Vol. 67. – P. 211-220.
- 40 Зашквара В.В., Ильин А.М., Крючков В.Ф. Два случая фокусировки осесимметричного пучка заряженных частиц в гиперболическом поле // *ЖТФ*. – 1976. - Т.46. - С.1572-1573.
- 41 Мамонтов Е.В., Ивлев Д.А. Гиперболоидный масс-спектрометр на усеченной ловушке // *Письма в ЖТФ*. – 1999. - Т.25., вып. 10. - С. 51-56.
- 42 Jacka M., Kirk M., El Gomati M. M., Prutton M. A fast, parallel acquisition, electron energy analyzer: The hyperbolic field analyzer // *Rev. Sci. Instrum.* – 1999. - Vol. 70, № 5. - P. 2282-2287.
- 43 Jacka M., Kale A., Traitler N. Hyperbolic field electron energy analyzer with second order focusing // *Rev. Sci. Instrum.* – 2003. – Vol.74, № 10. - P. 4298-4300.
- 44 Iwasaki K., Mitsuke K. Development of a conical energy analyzer for angle-resolved photoelectron spectroscopy // *Surface Review and Letters*. – 2002. – Vol. 9, № 1. – P. 583-586.
- 45 Khursheed A. Design of a parallel magnetic box energy analyzer attachment for electron microscopes // *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* -2011. – Vol. 184. – P.57-61.
- 46 Miron C., Simon M., Leclercq N., Morin P. New high luminosity «double toroidal» electron spectrometer // *Rev. Sci. Instrum.* – 1997. – Vol. 68, № 10. - P. 3728-3737.

- 47 Nishimura T., Ikeda A., Kido Y. A new toroidal electrostatic analyzer and application to surface analysis // *Rev. Sci. Instrum.* – 1998. – Vol. 69, № 4, - P.1671-1675.
- 48 Belov V.D., Yavor M.I. New type of high-resolution high-transmission energy analyzers based on toroidal mirrors // *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* – 1999. - Vol. 104. – P. 47-54.
- 49 Tadich A., Riley J., Huwald E. and other. Full Hemisphere Fermi Surface Mapping Using A Novel Toroidal Electron Spectrometer // *The 10<sup>th</sup> International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation.* – Melbourne, 2009. - 943p.
- 50 Трубицын А.А. Моделирование ионно-оптических систем для масс-спектрметров с квадрупольным фильтром масс // *ЖТФ (Краткие сообщения).* -2003. - Т.73, вып.6. - С. 136-137.
- 51 Le Guen K., Ceolin D., Guillemin R. and other. Development of a four-element conical electron lens dedicated to high resolution Auger electron-ion(s) coincidence experiments // *Rev. Sci. Instrum.* – 2002. - Vol. 73, № 11. - P. 3885-3894.
- 52 Белов В.Д. Иммерсионные линзы в аксиально-симметричных электростатических системах сферического секторного дефлектора с пространственной фокусировкой второго порядка // *Научное приборостроение.* – 2006. - Т.16, № 4. - С. 31-40.
- 53 Фишкова Т.Я. Комбинированная электростатическая линза // *Письма в ЖТФ.* – 2009. - Т.35, вып.9. - С. 31-36.
- 54 Zashkvara V.V., Ashimbaeva B.U. Time-of-flight focusing in a system consisting of electrostatic mirrors with two-dimensional fields// *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.* – 1995. – № A 364, is.3. – P.401-408.
- 55 Hansch P., Norby J.R., Evans S.H., Van Woerkom L.D. An ellipsoidal mirror time-of-flight photoelectron energy analyzer // *Rev. Sci. Instrum.* - 1995. – Vol.66, № 12. - P. 5512-5515.
- 56 Семкин Н.Д., Пияков И.В., Воронов К.Е., Помельников Р.А. Перспективы развития времяпролетных масс-спектрметров для анализа газовых и пылевых частиц // *Прикладная физика.* – 2002. - № 2. - С. 124-141.
- 57 Веренчиков А.Н., Явор М.И., Хасин Ю.И., Гаврик М.А. Многоотражательный планарный времяпролетный масс-

- анализатор I. Анализатор для параллельного tandemного спектрометра // ЖТФ. – 2005. - Т.75, вып.1. - С.74-83.
- 58 Hilbert A., Barwick B., Fabrikant M., Uiterwaal C.J.G.J., Batelaan H.. A high repetition rate time-of-flight electron energy analyzer // Applied physics letters. - 2007. – Vol. 91, № 173506. - P. 1-3.
- 59 Zashkvara V.V., Masyagin V.E., Ashimbaeva B.U., Kovalik A. and other. Verification of focusing properties of the multicascade electrostatic analyzer // J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. – 1995. - Vol. 71. – P.87 – 92.
- 60 Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я. Магнитостатический масс-анализатор типа плоского зеркала с фокусировкой второго порядка // Письма ЖТФ. – 2002. - Т.28, вып. 4. - С.65-70.
- 61 Trubitsyn A.A. Cylindrical mirror analyzer with high energy resolution // J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. – 1995. – Vol.73. – P. 305-310.
- 62 Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я. Электростатический спектрограф в виде усеченного цилиндра // ЖТФ. – 2001. - Т.71, вып.11. - С.133-135.
- 63 Belov V.D., Yavor M.I. High-resolution energy analyzer with a large angular acceptance for photoelectron spectromicroscopy applications// Rev. Sci. Instrum. – 2000. - Vol. 71, № 4. - P.1651-1655.
- 64 Downie P., Reynolds D.J., Powis I. Parallel, multichannel energy and angle resolving electrostatic electron analyzer // Rev. Sci. Instrum. - 1995. – Vol. 66, № 7. - P. 3807-3818.
- 65 Kienle M., Plies E. An off-axis multi-channel analyzer for secondary electrons // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2004. - № A519. – P. 325–330.
- 66 David D.E., Popovic D.B., Antic D., Michl J. A multichannel electron energy loss spectrometer for low-temperature condensed films //J. of Chem.Phys. - 2004. – Vol. 121, № 21, - P.10542 -10550.
- 67 Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я. Многоканальный энергофильтр в виде цилиндра с закрытыми торцами и осевым нитевидным электродом // Письма ЖТФ. – 2004. - Т.30, вып. 20. - С.25-29.

- 68 Cizmar P., Müllerová I., Jacka M., Pratt A. New multichannel electron energy analyzer with cylindrically symmetrical electrostatic field // *Rev. Sci. Instrum.* - 2007. - Vol. 78, № 053714. - P. 1-5.
- 69 Tepermeister I., Sawin H.H. Modeling and construction of a novel electron energy analyzer for rapid X-ray photoelectron spectroscopy spectra acquisition // *Rev. Sci. Instrum.* - 1992. - Vol. 83, № 8. - P. 3828-3834.
- 70 Hu D.Q., Leung K.T. Simion study of the fringing field effects in deflector-type electrostatic electron energy analyzers: A new flexible Jost-based correction scheme // *Rev. Sci. Instrum.* - 1995. - Vol. 66, № 4. - P. 2865-2870.
- 71 Kelly M.A. A new electron energy analyzer for electron spectroscopy // *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* - 1999. - Vol. 98-99. - P.55-66.
- 72 Shiraki S., Ishii H., Nihei Y. Development of a high-performance angle-resolving electron energy analyzer // *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* - 2001. - Vol. 114-116. - P. 1043-1048.
- 73 Nandi T., Ahmad N., Singh H.K., Pillay R.G. Inclined straight electrostatic analyzer // *Rev. Sci. Instrum.* - 2004. - Vol. 75, № 11. - P. 5041-5043.
- 74 Воробьев Г.С., Дрозденко А.А., Нагорный Д.А. Установка для измерения статических характеристик высокоинтенсивных электронных пучков // *Приборы и техника эксперимента.* - 2009. - № 1. - С. 115-118.
- 75 Марьин Б.В., Поландов А.Г. Сегментоидные электростатические анализаторы для регистрации низкоэнергичных заряженных частиц // *Приборы и техника эксперимента.* - 2002. - № 3. - С. 73-77.
- 76 Голиков Ю.К. Определение электростатических полей по заданным характеристикам движения заряженных и дипольных частиц: автореф. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.04. - Ленинград, 1985. - 20 с.
- 77 Голиков Ю.К., Уткин К.Г., Чепарухин В.В. Расчет элементов электростатических электронно-оптических систем. - Ленинград: ЛПИ, 1984. - 78 с.

- 78 Zashkvara V.V., Tyndyk N.N. Electrostatic axially symmetric multipole in deflector-type analyzers // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. – 1992. – № A 313. – P. 315-327.
- 79 Zashkvara V.V., Tyndyk N.N. Axially symmetric multipole in magnetic analyzers // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. – 1992. – № A 321. – P. 439-446.
- 80 Zashkvara V.V., Tyndyk N.N. Two-sector electrostatic deflector based on superposition of cylindrical field and axially symmetric multipoles // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. – 1993. – № A 328. – P. 416-434.
- 81 Зашквара В.В., Тындык Н.Н. Осесимметричные электростатические мультиполи, их приложение // ЖТФ. – 1991. – Т.61, №4. – С.148-157.
- 82 Зашквара В.В., Тындык Н.Н. Мультипольные решения волнового уравнения // ЖТФ. – 1998. - Т.68, № 6. - С.9-14.
- 83 Zashkvara V.V. On circular multipole calculations // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. – 1995. – № A 354. – P. 171-174.
- 84 Зашквара В.В., Тындык Н.Н. Нелапласовы круговые мультиполи // ЖТФ. – 1995. - Т.65, вып. 7. – С.154-1666.
- 85 Zashkvara V.V., Tyndyk N.N. Potential fields based on circular multipole series // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. – 1996. – № A 370. – P. 452-460.
- 86 Zashkvara V.V., Tyndyk N.N. The method for the calculation of multipole-cylindrical fields // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. – 1999. – № A 370. – P. 223-231.
- 87 Спивак-Лавров И.Ф. Решение задачи Дирихле для уравнения Лапласа в случае многосвязной области с точечной симметрией // ЖТФ. – 1999. - Т.69, вып.3. - С. 1 - 9.
- 88 Zashkvara V.V., Ashimbaeva B.U., Chokin K.Sh. Calculation of trajectories in a multipole cylindrical field // J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. - 2002. – Vol.122. - P.195-202.
- 89 Зашквара В.В., Ашимбаева Б.У., Чокин К.Ш., Масягин В.Е. Расчет траекторий заряженных частиц в электростатическом неоднородном поле // Известия НАН РК, Сер.физ.-мат. - 2000. - №2.- С.72-78.

- 90 Голиков Ю.К., Григорьев Д.В., Шорина Т.А. Электрические поля с кольцевыми особенностями в корпускулярной оптике // Письма в ЖТФ. – 1999. - Т. 25, вып.9. - С. 23-27.
- 91 Голиков Ю.К., Уткин К.Г., Григорьев Д.В. Обратные задачи теории электростатических энергоанализаторов. I // ЖТФ. – 1999. - Т.69, вып.9. - С. 128-131.
- 92 Габдуллин П.Г., Голиков Ю.К., Краснова Н.К., Давыдов С.Н. Применение формулы Донкина в теории энергоанализаторов. I // ЖТФ. – 2000. - Т.70, вып. 2. - С. 91-94.
- 93 Габдуллин П.Г., Голиков Ю.К., Краснова Н.К., Давыдов С.Н. Применение формулы Донкина в теории энергоанализаторов. II // ЖТФ. – 2000. - Т.70, вып. 3. - С. 44-47.
- 94 Голиков Ю.К., Краснова Н.К. Электрические поля, однородные по Эйлеру, для электронной спектрографии // ЖТФ. – 2011. - Т. 81, вып. 2. - С.9-15.
- 95 Голиков Ю. К., Краснова Н. К., Соловьев К. В., Григорьев Д. В. О некоторых аналитических связях осесимметричных и двумерных лапласовых полей // Прикладная физика. – 2004. - №1. - С.48-49.
- 96 Голиков Ю.К., Краснова Н.К., Соловьев К.В. Трехмерные лапласовы потенциалы с комплексным представлением // ЖТФ. – 2006. - Т. 76, вып.1. - С. 24-27.
- 97 Голиков Ю. К., Соловьев К. В. Новые аналитические представления мультипольных электромагнитных структур // Прикладная физика. – 2006. – №6. - С.5-7.
- 98 Zashkvara V.V., Ashimbaeva B.U., Chokin K. Sh., Rysavy M. Effect of the fringe field of one-dimensional aperture gratings on the transmission and focusing of the cylindrical mirror analyzer // J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. – 1992. - Vol.58. – P. 271 – 283.
- 99 Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я. Двухпериодный цилиндрический энергоанализатор с торцевыми электродами // ЖТФ. – 1997. - Т.67, № 8. - С. 89-91.
- 100 Явор С.Я. Фокусировка пучков заряженных частиц с распределением энергии по сечению в диспергирующих системах // ЖТФ. -1997. - Т.67, № 12. - С.50-53.

- 101 Явор С.Я. Фокусировка пучков заряженных частиц с энергоугловой корреляцией в плоском конденсаторе // ЖТФ. - 1998. - Т.68, № 10. - С.138-139.
- 102 Голиков Ю. К., Краснова Н. К., Соловьев К. В., Григорьев Д. В., Любчик А. Д. Согласующие и корректирующие электрические зеркала в электронной оптике // Прикладная физика. - 2002. - № 3. - С. 55-67.
- 103 Голиков Ю.К., Холин Н.А., Шорина Т.А. Теория и практика квазиконических энергоанализаторов // Научное приборостроение. – 2009. - Т.19, №2. - С. 13-24.
- 104 Tsuno K. Electron optical analysis of a high-resolution electron energy loss spectrometer with a retarding Wien filter // Rev. sci. instrum. – 1992. – Vol. 63, № 9. - P. 4112-4121.
- 105 Martel R., McBreen P. H. Optimization of the geometric disposition of the deflecting electrodes in HREELS spectrometers // Rev. sci. instrum. - 1992. – Vol.63, № 5. - P.3007-3012.
- 106 Гликман Л.Г., Голоскоков Ю.В., Карецкая С.П. К теории фокусировки пучков заряженных частиц в двумерном электростатическом поле со средней плоскостью I // ЖТФ. – 1996. - Т.66, №5. - С. 118-127.
- 107 Демин С.К., Сафронов С.И., Тарасов Р.П. Численный анализ и синтез электронно-оптических систем сложной структуры I // ЖТФ. - 1998. - Т.68, №2. - С.97-103.
- 108 Явор М.И. Расчет фокусировки и aberrаций пучков заряженных частиц в полярно-тороидальных анализаторах // ЖТФ. – 1998. - Т. 68, № 4. - С.107-111.
- 109 Дуглас Д.Дж., Глебова Т.А., Коненков Н.В., Судаков М.Ю. Пространственные гармоники поля квадрупольного фильтра масс с круглыми электродами // ЖТФ. - 1999. - Т.69, вып.10. - С. 96-101.
- 110 Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я. Нагрузочные характеристики электростатической коаксиальной линзы // ЖТФ. – 1999. - Т.69, вып.6. - С. 123-126.
- 111 Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я. Масс-анализатор зеркального типа с цилиндрической формой полюсов // ЖТФ (краткие сообщения). – 2002. - Т.72, вып.10. - С.119-123.

- 112 Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я. Энергоанализатор с цилиндрической формой электродов // Письма ЖТФ. - 2004. - Т.30, вып.7. -С.36-41.
- 113 Sagara T., Boesten L., Nishida S., Okada K. Resolution improvements for hemispherical energy analyzers// Rev. sci. instrum. – 2000. - Vol.71, № 11. - P. 4201-4207.
- 114 Kugeler O., Marburger S., Hergenbahn U. Calculation and measurement of the time-of-flight spread in a hemispherical electron energy analyzer // Rev. sci. instrum. – 2003. – Vol. 74, № 9. - P. 3955-3961.
- 115 Курнаев В.А., Урусов В.А. Влияние аппаратных функций электростатических и магнитных анализаторов на обработку экспериментальных результатов // ЖТФ. – 1997. - Т.67, № 6. - С. 86-91.
- 116 Курнаев В.А., Урусов В.А. Влияние флуктуаций потенциалов на аппаратные функции электростатических анализаторов // ЖТФ. – 1997. - Т.67, № 6. - С. 92-95.
- 117 Шевченко С.И. Некоторые аспекты работы энергоанализатора типа цилиндрическое зеркало. Ч. I. // Научное приборостроение. – 2011. - Т.21, № 1. - С. 76-86.
- 118 Шевченко С.И. Об особенностях нахождения аксиальных электростатических полей вблизи оси. II. Метод аналитической замены // Научное приборостроение. – 2009. - Т.19, № 1. - С. 58-66.
- 119 Шевченко С.И. Метод вычисления аппаратной функции аксиальных электростатических энергоанализаторов // Научное приборостроение. – 2010. - Т.20, № 2. - С. 73-81.
- 120 Гринфельд Д.Э., Монастырский М.А., Тарасов В.А. Методы возмущений в задачах // Прикладная физика. – 2006. - №3. - С.64-74.
- 121 Protopopov O.D., Trubitsyn A.A. Quasi-conical energy analyzers for electron spectroscopy // J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. – 1994. – Vol. 69. - P.159-163.
- 122 Трубицын А.А. Корреляционный метод поиска угловой фокусировки высших порядков//ЖТФ. – 2001. - Т. 71, вып. 5. - С. 126-127.

- 123 Трубицын А.А. Программа "Фокус" моделирования аксиально-симметричных электронно-оптических систем: алгоритмы и характеристики // Прикладная физика. – 2008. - №2. - С.56-61.
- 124 Астахов В.И., Дягилев А.А., Трубицын А.А. Программный комплекс "Focus Planar System" для моделирования планарных электронно- и ионно-оптических систем // Прикладная физика. – 2010. - №5. - С.66-72.
- 125 Гуров В.С., Трубицын А.А., Мамонтов Е.В., Дягилев А.А. Решение плоской внешней задачи Дирихле методом граничных элементов// Вестник РГРТУ. - 2008. - № 2, вып. 24. - С. 91-94.
- 126 Скунцев А.А., Трубицын А.А. Численный метод поиска условий пространственной фокусировки высших порядков // Вестник РГРТУ. - 2009. - Вып. 30, № 4, - С. 40.
- 127 Помозов Т.В., Явор М.И. Устранение осевого астигматизма в краевых полях сферического секторного дефлектора // Научное приборостроение. – 2008. - Т.18, №4. - С. 120-123.
- 128 Холин Н.А., Шорина Т.А., Кубрик Д. От квазиконических энергоанализаторов к сфероидальным // Научное приборостроение. – 2009. - Т.19, № 2. - С. 25-33.
- 129 Байсанов О.А., Доскеев Г.А., Зарипова З.Г., Спивак-Лавров И.Ф. Дифференциальные уравнения, определяющие отклонение частиц ионного пучка от осевой траектории в электрических и магнитных полях // Прикладная физика. – 2010. - Вып.3. - С.109-115.
- 130 Sise O., Ulu M., Dogan M., Martinez G., Zouros T.J.M. Fringing field optimization of hemispherical deflector analyzers using BEM and FDM // J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. – 2010. – Vol. 177. - P. 42–51.
- 131 Семенов С.О. Некоторые особенности расчета траекторий заряженных частиц на сетке потенциалов метода конечных элементов // Прикладная физика. - 2010. - Вып.3. - С.96-102.
- 132 Краснова Н.К. Двумерные степенные электронные спектрографы с плоскостью симметрии // ЖТФ. – 2011. - Т.81, вып.6. - С. 97-103.

- 133 Бадалян Г.В. Получение постоянных электрических полей заданной формы в неавтоэлектродной системе // ЖТФ. – 2011. – Т.81, вып.1. - С.140-143.
- 134 Ashimbaeva B.U., Chokin K.Sh., Saulebekov A.O. Focusing properties of a mirror analyzer with hexapole cylindrical field // J. of E.Spect. and Rel. Phen. -2005.–143 (1).– P.29-32.
- 135 Saulebekov A.O., Assylbekova S.N., Kambarova Zh.T., Tussupbekova A.K. Calculation of the charged particles trajectories in the hexapole cylindrical field // Eurasian Physical Technical Journal. – 2011. - V.8, No.2(16). - P. 41-49.
- 136 Ashimbaeva B.U., Chokin K.Sh., Saulebekov A.O., Kambarova Zh.T. Modeling of electron-optical scheme of hexapole-cylindrical analyzer // Applied Physics, 2012, Issue 2. - P.45-48.
- 137 Assylbekova S.N., Saulebekov A.O., Kambarova Zh.T. Numerical modeling of the electrostatic energy analyzer based on hexapole-cylindrical field with a concave outer electrode // Eurasian Physical Technical Journal. – 2015. - V.12, No 1 (23). – P.25-29.
- 138 Saulebekov A.O., Kambarova Zh.T., Saulebekova D.A. Modeling of electrostatic decapole-cylindrical mirror analyzer // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. - 2017 – 168. – 012078. doi:10.1088/1757-899X/168/1/012078
- 139 Saulebekov A.O., Kambarova Zh.T. Development of mirror energy analyzer based on electrostatic quadrupole-cylindrical field // Eurasian Physical Technical Journal. – 2017. - V.14, No 2 (28). – P.42-47.
- 140 Kambarova Zh.T., Trubitsyn A.A., Saulebekov A.O. Axially symmetric energy analyzer based on the electrostatic decapole-cylindrical field // Technical Physics. – 2018. - Vol. 63, No. 11. - P. 1667–1671.
- 141 Saulebekov A.O., Kambarova Zh.T. Calculation and modeling of the motion of charged particles in the quadrupole-cylindrical field // Eurasian Physical Technical Journal. – 2018. - V.15, No 1 (29). – P.55-60.
- 142 Saulebekov A.O., Trubitsyn A.A., Kambarova Zh.T., Saulebekova D.A. Electrostatic energy analyzer of charged particles on the basis of a quadrupole-cylindrical field in the “ring-axis” focusing regime // Eurasian Physical Technical Journal. – 2018. -

V.15, No 2 (30). – P.35-39.

143 Wannberg B. An electrostatic mirror spectrometer with coaxial electrodes for multi-detector operation // Nuclear Instruments and Methods. – 1973. - Vol. 107. - P. 549 – 556.

144 Зашквара В.В., Ашимбаева Б.У., Чокин К.Ш., Масягин В.Е. Расчет траекторий заряженных частиц в электростатическом неоднородном поле // Изв. НАН РК. - 2000. - № 2. - С.72-78.

145 Gurov V.S., Saulebekov A.O., Trubitsyn A.A. Approximate-Analytical Method of Calculating the Charged Particle Trajectories in Electrostatic Fields (Book Chapter). Advances in Imaging and Electron Physics. 2015, V.192, P. 87-115.

146 Трубицын А.А., Трубицын И.А. Программа «ФОКУС» моделирования статических и динамических систем корпускулярной оптики с аксиальной симметрией // Научное приборостроение: Межвуз. сб. науч. трудов.- Рязань, РИЦРГТА, 2002.- С. 77-81.

147 Хокс П., Каспер Э. Основы электронной оптики: в 2-х томах. Пер. с англ., М.: Мир, 1993. – 1032 с.

148 Трубицын А.А. Вычисление сингулярных интегралов при решении задачи Дирихле методом граничных элементов // Журнал вычислит. матем. и матем. физики. 1995. - Т. 35, № 4. – С. 532–541.

149 Harrower C.A. Measurement of electron energies by deflection in a uniform electric field // Rev. Sci. Instrum. - 1955. - Vol. 26(9). - P.850-854.

150 Litvin V.F. Electrostatic analyzer for studying the angular distributions of charged products of nuclear reactions // Instruments and experimental techniques. - 1958. – Vol. 3. -P.32-34.

151 Саулебеков А.О., Асылбекова С.Н. Описание траекторий заряженных частиц в электростатическом гексапольно-цилиндрическом поле // Вестник КарГУ. - 2004, №3 (35). - С.50-54.

152 Саулебеков А.О. Расчет траекторий движения заряженных частиц в гексапольно-цилиндрическом поле // Вестник КарГУ. - 2004. -№ 4 (36). - С.79-83.

153 Саулебеков А.О., Асылбекова С.Н., Тажибаева С.Д. Уравнение траекторий заряженных частиц в электростатическом

гексапольно-цилиндрическом поле // Вестник КарГУ. - 2004.- №3 (35). - С.46-49.

154 Саулебеков А.О., Камбарова Ж.Т., Василева А.Ф., Асылбекова С.Н., Якупов Р.М. Применение мультипольного подхода для синтеза электростатических полей // Вестник КарГУ.- 2007. - №1 (45). - С.38-46.

155 Зашквара В.В. Фокусировка пучка заряженных частиц конечной угловой расходимости в электростатическом анализаторе типа цилиндрического зеркала // Жур.тех.физики. – 1971. - Т. 41, № 1. – С. 193 - 197.

156 Saulebekov A.O. The calculation of charged particles trajectories for one case of electrostatic hexapole cylindrical field // Вестник Национальной инженерной академии. – 2006. - №2 (20). - С.66-71.

157 Меньшиков К.А. Электростатический анализатор заряженных частиц с тремя коаксиальными цилиндрическими электродами // ЖТФ. - 1982.- Т. 52, вып.11. - С. 2245-2252.

158 Саулебеков А.О. Электронно-оптические свойства некоторых осесимметричных электростатических полей и разработка на их основе энергоанализаторов для исследования поверхности твердого тела: автореф. ... докт.физ.-мат. наук. 01.04.04. - Алматы: ФТИ, 2007. -16 с.

159 Зашквара В.В., Корсунский М.И., Космачев О.С. Фокусирующие свойства электростатического зеркала с цилиндрическим полем // ЖТФ. - 1966. - Т. 36, № 1. - С. 132-138.

160 Saulebekov A.O., Assylbekova S.N., Kambarova Zh.T. Calculation of the charged particles trajectories in the hexapole cylindrical field // 8 International conference handbook: Charged Particle Optics. - Singapore, 2010. - P.77-78.

161 Ashimbaeva B.U., Chokin K.Sh., Saulebekov A.O., Kambarova Zh.T. Analyzers of the charged particles fluxes with the hexapole cylindrical field // 8 International conference handbook: Charged Particle Optics. - Singapore, 2010. - P.179-180.

162 Зашквара В.В., Редькин В.С. К вопросу о фокусировке пучка заряженных частиц электростатическим зеркалом с цилиндрическим полем // ЖТФ. - 1969. – Т.39. - С.1452-1456.

- 163 Ашимбаева Б.У., Чокин К.Ш., Саулебеков А.О., Камбарова Ж.Т. Моделирование электронно-оптической схемы анализатора с гексапольно-цилиндрическим полем // Тезисы 10 Всеросс. семинара «Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики». – М., 2011.- 55с.
- 164 Ашимбаева Б.У., Чокин К.Ш., Саулебеков А.О., Камбарова Ж.Т. Моделирование электронно-оптической схемы анализатора с гексапольно-цилиндрическим полем // Прикладная физика. – 2012. - № 2. - С.45-48.
- 165 Саулебеков А.О., Асылбекова С.Н., Камбарова Ж.Т., Кутум Б.Б. Организация защиты от влияния краевых полей в гексапольно-цилиндрическом анализаторе // Вестник КарГУ. Серия физика. – 2008. - №2 (50). - С. 54 - 59.
- 166 Siegbahn K., Kholine N., Golikov G. A high resolution and large transmission electron spectrometer // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. - 1997. - № A384. - P. 563-574.
- 167 Трубицын А.А., Толстогузов А.Б., Саулебеков А.О., Суворов Д.В., Тарабрин Д.Ю., Камбарова Ж.Т., Кукса П.И. Проектирование длиннофокусного оже-микроанализатора // Вестник РГРТУ. - 2012. - Вып.42, № 4, Ч.1. – С.54-59.
- 168 Саулебеков А.О., Трубицын А.А., Камбарова Ж.Т. Кесіктік электродтарға ие болатын гексапольдік-циліндрлік анализатордың электронды-оптикалық сұлбасын модельдеу // Вестник КарГУ. Серия Физика. – 2011. - №1 (61). - С. 73-77.
- 169 Камбарова Ж.Т. Васильева А.Ф., Кутум Б. Мультипольный подход в теории анализирующих электронно-оптических систем // Материалы XIV Межд.конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2007». – М., 2007. – 166 с.
- 170 Саулебеков А.О., Трубицын А.А., Камбарова Ж.Т. Компьютерное моделирование электростатического гексапольно-цилиндрического зеркального энергоанализатора // Вестник КарГУ. Серия физика. – 2011.- №3 (63). - С.37-41.
- 171 Баранова Л.А. Анализатор энергий заряженных частиц на основе модифицированного цилиндрического зеркала // ЖТФ. - 2013. -Т. 83., Вып. 4. -С. 149–151.
- 172 Баранова Л.А. Анализатор энергий заряженных частиц на основе модифицированного цилиндрического зеркала в режиме

фокусировки «кольцо–ось» // ЖТФ. - 2014. - Т. 84, Вып. 3. - С. 155–158.

173 Баранова Л.А. Цилиндрический зеркальный энергоанализатор в режиме впуска заряженных частиц через торцевую диафрагму // ЖТФ. - 2016. - Т. 86, Вып. 8. - С. 153–155.

174 Баранова Л.А. Усовершенствованный цилиндрический зеркальный энергоанализатор // ЖТФ. - 2017. - Т. 87, Вып. 3. - С. 458–461.

175 Saulebekov A.O., Venos D., Kambarova Zh.T. The high resolution electrostatic energy analyzer for space research // Eurasian Physical Technical Journal. – 2020. - V.17(33). – P.163-168.

Ғылыми басылым

**Камбарова Жанар Турсыновна**

**ЭЛЕКТРСТАТИКАЛЫҚ ӨРІСТЕР  
НЕГІЗІНДЕГІ ЖОҒАРЫ ТИІМДІ  
КОРПУСКУЛАЛЫ-ОПТИКАЛЫҚ  
ЖҮЙЕЛЕРДІ ҚҰРАСТЫРУ ЖӘНЕ  
ЕСЕПТЕУ**

*Монография*

*Авторлық түпнұсқадан басылды*

---

Басуға 21.12.2020 ж. қол қойылды. Пішімі 60×84 1/16. Қағазы офсеттік.  
Көлемі 8,125 б.т. Таралымы 500 дана. Тапсырыс № 675.

---

«Арко» баспасының типографиясында басылды  
Қарағанды қ., Сатпаев көшесі, 15. Тел. (7212) 41-17-80. E-mail: too\_arko@mail.ru