




И.Ф. Спивак-Лавров<sup>1</sup> , А.Ш. Амантаева<sup>1\*</sup> , О.А. Байсанов<sup>2</sup> , Т.Ж. Шугаева<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Қ.Жұбанов ат. Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан

<sup>2</sup>Екі мәрте Кеңес Одағының батыры Т. Ж. Бегельдинов ат. ӘҚК Әскери институты, Ақтөбе қ., Қазақстан

\*e-mail: [amantaeva.80@mail.ru](mailto:amantaeva.80@mail.ru)

## ЕКІ ӨЛШЕМДІ ӨРИСТЕРГЕ НЕГІЗДЕЛГЕН СТАТИКАЛЫҚ МАСС-АНАЛИЗАТОРЛАРДЫ ЖУЫҚТАП ЕСЕПТЕУ

Статикалық масс-анализаторларында электр және магнит өрістерін ортақ пайдалану жоғары аналитикалық мүмкіндіктерді қамтамасыз ете отырып, бөлшектерді тек масса бойынша тиімді жіктеуге мүмкіндік береді. Ажыратқыштығы жоғары масс-анализаторлар иондар шоғын энергия бойынша фокустау үшін ахроматтандыратын электростатикалық жүйені пайдаланады. Энергияның нөлдік дисперсиясы бар құрылғылар электрлік ахроматтандыру жүйелерінің және анализатордың магнит өрісінің бірлескен әрекеті арқылы жасалады, нәтижесінде шоқтағы иондар тек массалар бойынша жіктеледі. Магнит өрісіне түспес бұрын иондық сәуленің кеңеюі статикалық масса анализаторларының сапасын жақсартады. Бұл мақалада иондар шоғының қос фокусталуы бар статикалық масс-анализаторы қарастырылады. Электродтар шекараларындағы иондардың үдеуі мен баяулау процесі, олардың трансаксиалды линзамен фокусталуы және электростатикалық призманың сыну бетінің масс-анализаторының "сапа" параметріне әсері сипатталған. Масс-анализаторының сызықтық дисперсиясын арттыру үшін сектордың біртекті магнит өрісін екі өлшемді магниттік призма мен үш электродты трансаксиалды фокустық линзаның өрістеріне ауыстыру да қарастырылады. Магнит өрісіне кірер алдында иондар шоғының фокусталуын жақсарту үшін екі өлшемді электростатикалық призманы қолдану ұсынылады, бұл масса анализаторының сызықтық дисперсиясын арттыруға және сонымен қатар магнит өрісіне кірер алдында шоқтың енін кеңейтуге мүмкіндік береді. Бұл жұмыста екі өлшемді электр призмасының зарядталған бөлшектер шоғырына әсері қарастырылып, оның энергия бойынша бұрыштық дисперсиясының жуықталған өрнегі қарастырылды. Екі өлшемді электрлік және магниттік призмалары бар призмалық масс-анализаторының сызықтық дисперсиясын арттырып және оның сызықтық өлшемдерін азайта отырып, энергия бойынша фокустауды жүзеге асыруға болатындығы көрсетілген.

**Түйін сөздер:** масс-анализатор, энергия бойынша фокустау, «сапа» параметрі, масса бойынша дисперсия, энергия бойынша дисперсия, екі өлшемді магниттік призма.

I.F. Spivak-Lavrov<sup>1</sup>, A.Sh. Amantayeva<sup>1\*</sup>, O.A. Baisanov<sup>2</sup>, T.Zh. Shugaeva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Kazakhstan

<sup>2</sup>Military Institute of Air Defense Forces named after twice Hero of the Soviet Union T.Ya.Begeldinov, Aktobe, Kazakhstan

\*e-mail: [amantaeva.80@mail.ru](mailto:amantaeva.80@mail.ru)

### Approximate calculation of static mass analyzers based on two-dimensional fields

The concurrent utilization of electric and magnetic fields in static mass analyzers proves highly effective in sparticle separation solely based on their masses, thereby ensuring remarkable analytical capabilities. High-resolution mass analyzers employ an achromatizing electrostatic system to precisely focus ion radiation by energy. Devices featuring zero energy dispersion are created through the collaborative action of electric achromatizing systems and the magnetic field within the analyzer, resulting in ion separation based solely on mass. Expanding the ion beam prior to its magnetic field exposure enhances the overall quality of static mass analyzers. This article delves into a static mass analyzer with dual ion beam focusing, elucidating the ion acceleration and deceleration processes at electrode boundaries, their focalization via a transaxial lens, and the impact of the electrostatic prism's refractive surface on the mass analyzer's "quality" parameter. Additionally, the transition from a sector homogeneous magnetic field to the fields generated by a two-

dimensional magnetic prism and a three-electrode transaxial focusing lens is explored to augment the mass analyzer's linear dispersion. To refine ion beam focus pre-magnetic field entry, the proposed adoption of a two-dimensional electrostatic prism promises heightened linear dispersion in the mass analyzer while expanding the beam pre-magnetic field entry. This study also examines the impact of a two-dimensional electric prism on the charged particle beam, presenting an approximate expression for its angular energy dispersion. It is demonstrated that a prism-based mass analyzer integrating two-dimensional electric and magnetic prisms enables energy-focused operations alongside enhanced linear dispersion and reduced linear dimensions.

**Key words:** mass analyzer, energy focusing, "quality" parameter, mass dispersion, energy dispersion, two-dimensional magnetic prism.

**И.Ф. Спивак-Лавров<sup>1</sup>, А.Ш. Амантаева<sup>1\*</sup>, О.А. Байсанов<sup>2</sup>, Т.Ж.Шугаева<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Актюбинский региональный государственный университет им.К.Жубанова, г. Актобе, Казахстан

<sup>2</sup>Военный институт Сил воздушной обороны им. дважды Героя Советского Союза Т.Я.Бегельдинова, г. Актобе, Казахстан

\*e-mail: [amantaeva.80@mail.ru](mailto:amantaeva.80@mail.ru)

### Приближенный расчет статических масс-анализаторов на основе двумерных полей

Совместное использование электрических и магнитных полей в статических масс-анализаторах позволяет эффективно разделять частицы только по массе, обеспечивая высокие аналитические возможности. Масс-анализаторы с высоким разрешением используют ахроматизирующую электростатическую систему для фокусировки ионного излучения по энергии. Устройства с нулевой дисперсией по энергии создаются благодаря совместному действию электрических ахроматизирующих систем и магнитному полю анализатора, в результате ионы в пучке разделяются только по массам. Расширение ионного пучка перед попаданием в магнитное поле также улучшает качество статических масс-анализаторов. В данной статье рассматривается статический масс-анализатор с двойной фокусировкой пучка ионов. Описывается процесс ускорения и замедления ионов на границах электродов, их фокусировка трансаксиальной линзой и влияние преломляющей поверхности электростатической призмы на параметр "качество" масс-анализатора. Также рассматривается замена секторного однородного магнитного поля на поля двумерной магнитной призмы и трехэлектродной трансаксиальной фокусирующей линзы для увеличения линейной дисперсии масс-анализатора. Для улучшения фокусировки ионного пучка перед входом в магнитное поле предложено использовать двумерную электростатическую призму, что позволяет увеличить линейную дисперсию масс-анализатора и одновременно расширить пучок перед входом в магнитное поле. В данной работе было рассмотрено действие двумерной электрической призмы на пучок заряженных частиц и найдено приближенное выражение для ее угловой дисперсии по энергии. Показано, что в призмном масс-анализаторе с двумерной электрической и магнитной призмами можно осуществить фокусировку по энергии, одновременно увеличив при этом линейную дисперсию масс-анализатора и уменьшив его линейные размеры.

**Ключевые слова:** масс-анализатор, фокусировка по энергии, параметр «качество», дисперсия по массе, дисперсия по энергии, двумерная магнитная призма.

### Кіріспе

Статикалық және уақыт аралық масс-анализаторлары заттардың элементтік, изотоптық және химиялық талдауларының мәселелерін шешу үшін ғылымның, техниканың және өндірістің әртүрлі салаларында қолданылады. Дұрыс физикалық және математикалық теорияларға негізделген және есептеу технологияларының мүмкіндіктерін пайдаланатын осындай анализаторлардың

физикалық және аспаптық сипаттамаларын есептеудің жаңа әдістерін әзірлеу корпускулалық оптика саласындағы маңызды міндет болып табылады. Бұл жетілдірілген әдістер жоғары аналитикалық мүмкіндіктері бар құрылғыларды жасауға мүмкіндік береді [1-5].

Статикалық масс-спектрометрлерді жетілдіруге байланысты негізгі идеялар Астонның [6-8], Матауха мен Герцогтің [9], Демстердің [10] және т.б. жұмыстарынан бастау алады.

Статикалық және уақыт аралық масс-анализаторларының жұмысына негізделген негізгі физикалық заңдар классикалық электродинамика заңдары болып табылады. Электр және магнит өрістеріндегі зарядталған бөлшектің қозғалысы Лоренц күшінің әсерімен анықталады [11]. Бұл жағдайда магнит өрісі зарядталған бөлшектер шоқтарын энергия мен масса бойынша кеңістікте, ал электр өрісін тек энергия бойынша жіктейді. Нәтижесінде статикалық масс-анализаторларында электр және магнит өрістерінің энергиясының бірлескен дисперсиясы нөлге тең болатын электр және магнит өрістерінің комбинациясын таңдауға болады. Бұл жағдайда шоқтағы бөлшектердің бөлінуі тек масса бойынша жүреді. Энергия бойынша фокустауды жүзеге асыру үшін электр және магнит өрістерін бірге қолдану идеясы Астонға тиесілі, оның жұмысы Нобель сыйлығымен марапатталды. Ұшу кезінде масс-анализаторларында электростатикалық айналандыру қолдана отырып, уақыт аралығын энергияға бағыттауға болады [12].

### Зерттеу әдісі

Ажыратқыштығы жоғары масс-анализаторларда иондық сәуленің энергияға бағытталуын қамтамасыз ететін ахроматтандыратын электростатикалық жүйе бар. Мұндай жүйе ретінде әдетте цилиндрлік, сфералық немесе тороидтық конденсаторлар, сондай-ақ электростатикалық призмалық жүйе қолданылады [13]. Ахроматизациялық жүйелердің электр өрістері анализатордың магнит өрісімен бірге энергиясының нөлдік дисперсиясы бар құрылғыны жасауға мүмкіндік береді. Бұл жағдайда иондық сәуле энергия бойынша фокусталады және масса анализаторының магнит өрісінде иондар тек массалар бойынша бөлінеді.

Статикалық масс-анализаторларын жобалаудың сәтті тәсілдерінің бірі-иондық шоқты магнит өрісіне түспес бұрын кеңейту идеясы. Иондық сәуленің кеңеюі нәтижесінде статикалық масс-анализаторларында шоқ арқылы өтетін магнит ағыны артады [14]. Бұл осы құрылғылардың «сапа» көрсеткішінің жоғарылауына әкеледі.

Масс-анализаторлардың тиімділігін «сапа» параметрімен немесе  $Q$  - шамасымен сипаттауға болады [14], ол максималды ажыратқыштық  $R_{max}$ , көлденең бағыттағы шоқтың бұрыштық ажырауының  $2\alpha_u$  және ион көзінің енінің  $S_u$  көбейтіндісімен анықталады:

$$Q = R_{max} 2\alpha_u S_u, \quad (1)$$

мұнда

$$R_{max} = \frac{D_m}{|M|S_u}, \quad (2)$$

$D_m$  – масса бойынша сызықтық дисперсия,  $M$  – дисперсия бағытындағы сызықтық ұлғаю,  $S_u$  – иондар көзі саңылауының ені. (2)-ге (1)-ді қойып,  $Q$  үшін келесі өрнекті алуға болады:

$$Q = \frac{D_m}{|M|} 2\alpha_u. \quad (3)$$

(3)-ші өрнектен бірдей көлденең бағыттағы шоқтың  $2\alpha_u$  бұрыштық ажырауында «сапа»  $\frac{D_m}{|M|}$  қатынасымен анықталады. Секторлық біртекті магнит өрісі бар масс-спектрометрлер жағдайында бұл қатынасты сандық бағалау үшін өлшемсіз шаманы пайдалану ыңғайлы:

$$K = \frac{D_m}{|M|r_0}, \quad (4)$$

мұнда  $r_0$  – магнит өрісіндегі траекторияның қисықтық радиусы.

Дөңгелек траекториялар жағдайына арналған [14,15] жұмыста, ал жалпы жағдайда  $Q$ -статикалық масс-анализаторлардың шамасы нүктелік көзден шығатын біртекті иондық шоқтың қимасына енетін магнит өрісінің ағынымен анықталады деген теорема дәлелденді [16]. Бұл теорема статикалық масс-анализаторларының тиімділігін арттырудың қарапайым эвристикалық принципі береді, мұнда магниттің өзінде және магнитке кірер алдында иондық шоқ мүмкіндігінше кеңейтіледі.

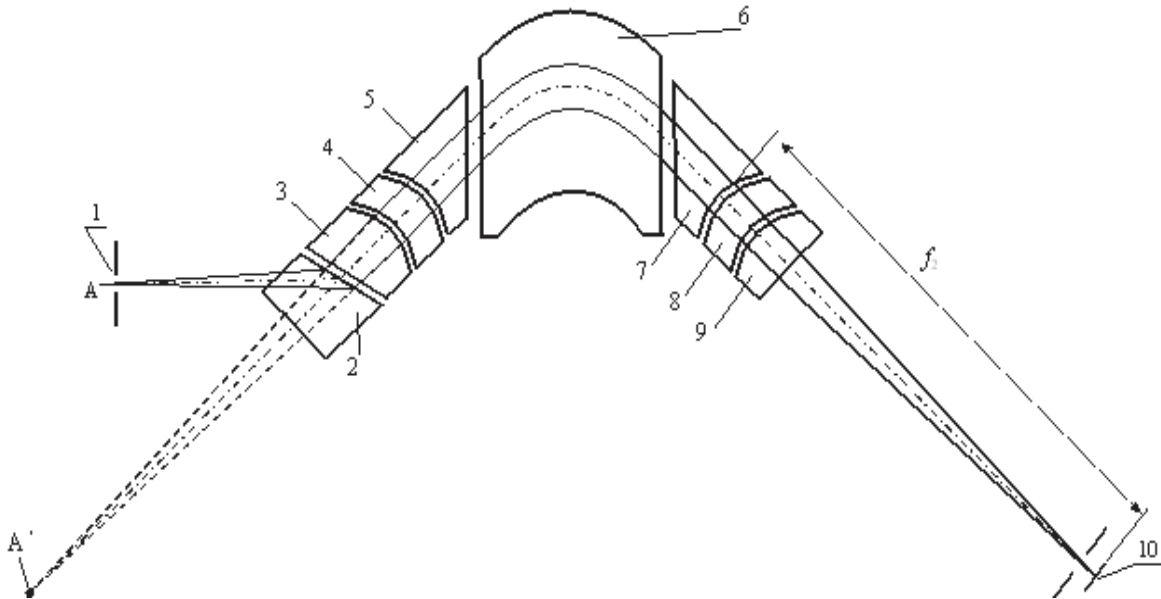
Магнит өрісіне кірер алдында иондық шоқты кеңейту әдістерінің бірі квадрупол линзаларын қолданумен байланысты [14,15]. Сонымен, шағын өлшемді статикалық масс-анализаторында осының арқасында "сапа" параметрі мен ажыратқыштығының рекордтық мәнін алуға болады [17]. Бұл масс-анализаторында секторлық магниттің орта жазықтығындағы сәуленің кеңеюіне 3 квадруполды линзаларды қолдану арқылы қол жеткізіледі, ал энергия мен бағыт бойынша фокустау тороидты конденсатор мен тағы 2 қосымша квадруполды линзалардың көмегімен жүзеге асырылады. Алайда, аралық сызықтық фокустың болуы құрылғының жарық күшін азайтады, ал квадрупол линзаларын қолдану оның құрылысын едәуір қиындатады.

Осы кемшілікті еңсеру үшін секторлық біртекті магниттік өрісті екі өлшемді магниттік призмамен ауыстыру керек, оның массасы бойынша  $D'_m$  бұрыштық дисперсия оның сызықтық өлшемдеріне байланысты емес. Бұл жағдайда масс-анализатордың  $D_m$  сызықтық дисперсиясын екі өлшемді магниттік призмадан кейін иондарды қабылдағыштың саңылауы осы линзаның фокустық жазықтығында орналасатындай етіп фокустаушы линзаның  $f_2$

фокустық қашықтығын кеңейту есебінен ұлғайтуға болады. Онда масса-анализатордың сызықтық дисперсиясы мынадай формуламен анықталады [18]:

$$D_m = D'_m f_2. \quad (5)$$

Бұл ретте иондар шоғырының жеткілікті жақсы кеңістіктік және энергетикалық фокусталуына қол жеткізуге болады.



**1 сурет** – Трансаксиалды, екі өлшемді электростатикалық және магниттік өрістерге негізделген статикалық масс-анализатордың схемалық кескіні

Иондар көзінің саңылауынан шығатын иондардың дивергентті сәулесі алдымен 2, 3 электродтарының шекарасында сыну арқылы  $\frac{V}{V_0}$  есе үдейді, содан кейін 3, 4 және 4, 5 электродтарының шекарасында баяулайды және екі өлшемді біртекті магнит өрісіне 6 түседі, содан кейін ол ион қабылдағыштың 10 саңылауы 7, 8, 9 электродтары бар трансаксиалды линзамен фокусталады.

Электростатикалық призманың сыну бетінен өткеннен кейін шоқ айтарлықтай кеңейеді, бұл магниттен өтетін шоқтың магнит өрісінің ағынын арттырады, осылайша (3) теңдіктегі "сапа" параметрі немесе  $Q$  – статикалық масс-анализаторының шамасы артады. 1-суреттен  $A'$  ион көзінің жорамал бейнесі магниттен жеткілікті қашықтыққа алыстайтындығын көруге болады.

Иондар шоғы қосарланып фокусталынатын статикалық масс-анализаторында [16] секторлық біртекті магнит өрісі екі өлшемді магниттік призма өрісімен және оның артына орналастырылған үш электродты трансаксиалды фокустық линзамен ауыстырылады, бұл магниттің сызықтық өлшемдерін өзгертпей,

фокустық линзаның фокустық қашықтығын ұлғайту арқылы масс-анализатордың сызықтық дисперсиясын арттыруға мүмкіндік береді [18].

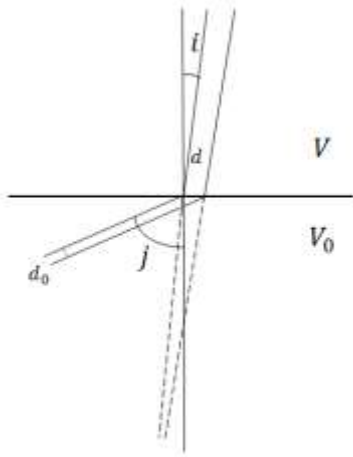
### Зерттеу нәтижелері мен талқылау

Бөлшектер шоғы екі өлшемді электр өрісінен өткенде, яғни  $V$  потенциалдан  $V_0$  потенциалға өткенде жарық бір ортадан екінші ортаға өткендегідей сынады.  $V$  потенциалдан  $V_0$  потенциалға өту шекарасы тиімді сыну шеті деп аталады. 2-суреттен бөлшектер шоғының әрекетіне Снеллиус формуласын қолданып, келесі теңдікті алуға болады:

$$\frac{\sin j}{\sin i} = \sqrt{\frac{V}{V_0}}, \quad (6)$$

$$\frac{\sin j}{\sin(i + \Delta i)} = \sqrt{\frac{V + \Delta U}{V_0 + \Delta U}}, \quad (7)$$

мұндағы  $j$  - түсу бұрышы,  $i$  – сыну бұрышы,  $\Delta U$  – энергия бойынша таралу.



2 сурет - Екі өлшемді электр өрісіндегі бөлшектер шоғының схемалық әрекеті

Түбір астындағы қосылғыштарды  $V_0$ -ге бөлсек және  $\frac{\Delta U}{V_0} = \varepsilon$  ескерсек, онда:

$$\frac{\sin j}{\sin(i + \Delta i)} = \sqrt{\frac{V}{V_0 + \varepsilon}} = \left(\frac{V}{V_0 + \varepsilon}\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{1}{2}\varepsilon\right). \quad (8)$$

$\sin(i + \Delta i) = \sin i \cos \Delta i + \cos i \sin \Delta i$  тригонометриялық теңдеуді,  $\cos \Delta i = 1$  ал аз бұрышта  $\sin \Delta i = \Delta i$  ескерсек,  $\sin(i + \Delta i) = \sin i + \cos i \Delta i$ . (8) теңдеуге түрлендірулер енгізіп, аз параметрлерді дәрежелері бойынша жіктеп [19,20], келесі түрге келтіруге болады:

$$\begin{aligned} \frac{\sin j}{\sin i} (1 + \tan i \Delta i)^{-1} &= \sqrt{\frac{V}{V_0}} \left(1 + \frac{V_0}{V} \varepsilon\right)^{\frac{1}{2}} = \\ &= \sqrt{\frac{V}{V_0}} \left(1 + \frac{V_0}{2V} \varepsilon\right) \left(1 - \frac{1}{2}\varepsilon\right). \quad (9) \end{aligned}$$

Бұдан,

$$\frac{\sin j}{\sin i} (1 - \tan i \Delta i) = \sqrt{\frac{V}{V_0}} \left(1 + \left(\frac{V_0}{2V} - \frac{1}{2}\right) \varepsilon\right) = \sqrt{\frac{V}{V_0}} \left[1 + \left(\frac{V_0}{2V} - \frac{1}{2}\right) \varepsilon\right], \quad (10)$$

$$-\frac{\sin j}{\sin i} \tan i \Delta i = \frac{1}{2} \left(\frac{V_0}{V} - 1\right) \varepsilon, \quad (11)$$

$$\Delta i = -\frac{\tan i}{2} \left(1 - \frac{V_0}{V}\right) \varepsilon. \quad (12)$$

$\Delta i = D_\varepsilon \varepsilon$ ,  $V > V_0$  болғанда:

$$D_\varepsilon = \frac{\tan i}{2} \left(1 - \frac{V_0}{V}\right). \quad (13)$$

(13)-теңдеу энергия бойынша дисперсины береді.

Түскен бөлшектер шоғының ені  $d_0$ , ал тиімді сыну шетінен өткеннен кейінгі ені  $d$  деп белгілесек,  $d = \frac{d_0}{\cos j} \cos i$  болатындығын көруге болады. Олай болса  $d > d_0$ , яғни магнит өрісіне кірер кездегі бөлшектер шоғының ені кеңейетіндігі көрінеді. Визуалды түрде жорамал иондық шоқ көзі қашықтайды. Бұл өз кезегінде масс-анализатор өлшемінің кішірею эффектісін береді.

### Қорытынды

Екі өлшемді электростатикалық призmanın сыну беті мен үш электродты трансаксиалды линзалары, ион көзі мен қабылдағышы бар ахроматикалық статикалық масс-анализаторының ерекшелігі, масс-анализаторының дисперсиясын арттыру үшін сектордың біртекті магнит өрісі екі өлшемді магниттік призма өрісімен және оның артына орналастырылған үш электродты трансаксиалды фокустық линзамен ауыстырылады. Бұл фокустық линзаның фокустық қашықтығын ұлғайту есебінен масс-анализаторының сызықтық дисперсиясын ұлғайтуға мүмкіндік береді.

Сыну шетінен өткен иондық шоқтың енінің кеңеюі нәтижесінде жорамал иондық шоқ көзінің қашықтауы масс-анализатор өлшемінің кішіреюіне мүмкіндік береді.

### Қаржыландыру

Жұмыс ҚР ҒЖБМ ҒК «Ғарыштық зерттеулерге арналған энергия және массалық анализаторларды әзірлеу» ЖТН АР22685992 гранты бойынша жүзеге асырылды.

### Әдебиеттер

- 1 Kambarova, Z. Expansion of the functional capacities of electrostatic mirror analyzers for electron spectroscopy // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – Vol.5 (5(125)). – P.53–61.
- 2 Saulebekov, A.O., Kambarova, Zh.T., Omarova, G.S. Miniature highly sensitive electron spectrometer for the analysis of corpuscular fluxes // Eurasian Physical Technical Journal. – 2023. – Vol.20 (2-44). – P.112–117.
- 3 Spivak-Lavrov I.F. Analytical Methods for The Calculation and Simulation of New Schemes of Static and Time-of-Flight Mass Spectrometers // Advances in Imaging and Electron Physics. – 2016. – Vol. 193. – P.45–128.

- 4 Spivak-Lavrov I.F., Shugaeva T.Zh., Sharipov S.U. Solutions of the Laplace equation in cylindrical coordinates, driven to 2D harmonic potentials // *Advances in Imaging and Electron Physics*. – Burlington: Academic Press. – 2020. – Vol. 215. – P. 181–193.
- 5 Spivak-Lavrov I.F., Shugaeva T.Zh., Kalimatov T.S. Mass analyzer with conic achromatic prism and transaxial lenses // *International Journal of Mass Spectrometry*. – 2019. – Vol.444. – Art.No.116180.
- 6 Aston F.W. A second-order focusing mass and isotopic weights by the by doublet method // *Proc. Roy. Soc.* – 1937. – Vol.163A. – P.391-404.
- 7 Aston F.W., Fowler R.H. Some problems of the mass spectrograph. // *Phil. Mag.* – 1922. – Vol.43. – P.514-528.
- 8 Aston F.W. A positive ray spectrograph // *Phil. Mag.* – 1919. – Vol. 38. – P.707-714.
- 9 Mattauch J. A doublet- focusing mass spectrograph and the masses of N15 and O18 // *Rev.* – 1936. – Vol. 50. – P. 617-623.
- 10 Dempster A.J. New methods in mass spectroscopy // *Proc. Amer. Phil. Soc.* –1935. – Vol.75. – P. 755-767.
- 11 Силады М. Электронная и ионная оптика: Пер. с англ. – Москва: Мир, 1990.
- 12 Karataev V.I., Mamirin B.A., Shmikk B. Time-of-Flight mass spectrometer/US Patent № 4072862, 1978; UK Patent № 1474149, 1977; French Patent № 7530831, 1978; FRG Patent № 2532552, 1980. *J Tech Phys.* 1971;41:1458-1465.
- 13 Кельман В.М., Родникова И.В., Секунова Л.М. Статические масс-спектрометры. – Алма-Ата: Наука, 1985. – С. 98-122
- 14 Wolnik H.// *Nucl. Instr, ant Meth.* – 1971. – Vol. 95, N.3. – P. 453-460.
- 15 Вольник Г. Оптика заряженных частиц. – Санкт-Петербург, 1992. – 208 с.
- 16 Гликман Л.Г., Спивак-Лавров И.Ф. Общий критерий качества статических масс-анализаторов с совмещенными электрическим и магнитным полями // *Письма в ЖТФ.* – 1990. – Т.16. Вып. 13. – С. 26–29.
- 17 Ishihara M., Kammei Y., Matsuda H. A high-perfomance mass spectrometr for very small size // *Nucl. Inst. and Meth, in Phys. Res. A.* – 1995. – Vol.363 (1, 2). – P.440-444.
- 18 Байсанов О.А, Спивак-Лавров И.Ф., Амантаева А.Ш. Трансаксиалды, екі өлшемді электростатикалық және магниттік өрістерге негізделген статикалық масса анализаторы // Пайдалы модельге патент № 8948. «Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМК берген, Астана 01.11.2023.
- 19 Коновалова Е.И., Яблокова. Л.В. Численные методы математического анализа: учебное пособие. – Самара: Издательство Самарского университета, 2022 – 149 с.
- 20 Демидович Б. П., Марон И. А., Шувалова Э. З. Численные методы анализа. Приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения. - Издательство "Лань", 5-е изд., 2022 – 400 с.

## References

- 1 Z. Kambarova, *East.-Eur. J. Enterp. Technol.* 5(125), 53–61 (2023).
- 2 O. Saulebekov, Zh. T. Kambarova, G. S. Omarova, *Eurasian Phys. Tech. J.* 20(2-44), 112–117 (2023).
- 3 F. Spivak-Lavrov, *Adv. Imaging Electron Phys.* 193, 45–128 (2016).
- 4 F. Spivak-Lavrov, T. Zh. Shugaeva, S. U. Sharipov, *Adv. Imaging Electron Phys.* 215, 181–193 (2020).
- 5 F. Spivak-Lavrov, T. Zh. Shugaeva, T. S. Kalimatov, *Int. J. Mass Spectrom.* 444, Art. No. 116180 (2019).
- 6 F. W. Aston, *Proc. Roy. Soc.* 163A, 391–404 (1937).
- 7 F. W. Aston, R. H. Fowler, *Phil. Mag.* 43, 514–528 (1922).
- 8 F. W. Aston, *Phil. Mag.* 38, 707–714 (1919).
- 9 J. Mattauch, *Rev.* 50, 617–623 (1936).
- 10 J. Dempster, *Proc. Am. Phil. Soc.* 75, 755–767 (1935).
- 11 M. Silad'i, *Elektronnaya i ionnaya optika* (Mir, Moscow, 1990). (In Russ.)
- 12 V. I. Karataev, B. A. Mamirin, B. Shmikk, US Patent No. 4072862, UK Patent No. 1474149, French Patent No. 7530831, FRG Patent No. 2532552, *J. Tech. Phys.* 41, 1458–1465 (1971).
- 13 V. M. Kel'man, I. V. Rodnikova, L. M. Sekunova, *Statische mass-spektrometry* (Nauka, Alma-Ata, 1985), pp. 98–122. (In Russ.)
- 14 H. Wolnik, *Nucl. Instr. Meth.* 95(3), 453–460 (1971).
- 15 G. Vol'nik, *Optika zaryazhennykh chastits* (St. Petersburg, 1992), 208 p. (In Russ.)
- 16 L. G. Glikman, I. F. Spivak-Lavrov, *Pisma Zh. Tekh. Fiz.* 16(13), 26–29 (1990). (In Russ.)
- 17 M. Ishihara, Y. Kammei, H. Matsuda, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* 363(1, 2), 440–444 (1995).
- 18 O. A. Baisanov, I. F. Spivak-Lavrov, A. Sh. Amantaeva, Patent No. 8948 (Astana, National Institute of Intellectual Property, 2023). (In Russ.)
- 19 E. I. Konovalova, L. V. Yablokova, *Chislennye metody matematicheskogo analiza* (Samara Univ. Press, Samara, 2022), 149 p. (In Russ.)
- 20 B.P. Demidovich, I.A. Maron, E.Z. Shuvalova, *Chislennye metody analiza. Priblizhenie funktsii, differentsial'nye i integral'nye uravneniya* (Lan', 5th ed., 2022), 400 p. (In Russ.)

**Мақала тарихы:**

Түсті – 03.05.2024

Түзетілген түрде түсті – 17.06.2024

Қабылданды – 08.09.2024

**Article history:**

Received 3 May 2024

Received in revised form 17 June 2024

Accepted 8 September 2024

**Авторлар туралы мәлімет:**

1. **И.Ф. Спивак-Лавров** – физ.мат.ғыл.докт., проф. Қ.Жұбанов ат. Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан. email: spivakif@rambler.ru

2. **А.Ш. Амантаева** (автор корреспондент) – Қ.Жұбанов ат. Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан. email: [amantaeva.80@mail.ru](mailto:amantaeva.80@mail.ru)

3. **О.А. Байсанов** – физ.мат.ғыл.канд., Екі мәрте Кеңес Одағының батыры Т. Ж. Бегельдинов ат. ӘҚК Әскери институты, Ақтөбе қ., Қазақстан email: baisanov@mail.ru

4. **Т.Ж. Шугаева** – PhD, Қ.Жұбанов ат. Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан. email: tlektes21@mail.ru

**Information about authors:**

1. **I.F. Spivak-Lavrov** – Dr. Phys. Math. Sci., Prof., K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Kazakhstan. email: spivakif@rambler.ru

2. **A.Sh. Amantayeva** (corresponding author) – K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Kazakhstan. email: [amantaeva.80@mail.ru](mailto:amantaeva.80@mail.ru)

3. **O.A. Baisanov** – Cand. Phys. Math. Sci., Military Institute of Air Defense Forces named after twice Hero of the Soviet Union T.Ya.Begeldinov, Aktobe, Kazakhstan. email: baisanov@mail.ru

4. **T.Zh. Shugaeva** – PhD, K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Kazakhstan. email: tlektes21@mail.ru