

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 3 (2021)

Павлодар

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/ADSD2201>

Бас редакторы – главный редактор

Кислов А. П.

к.т.н., доцент

Заместитель главного редактора

Талипов О. М., *доктор PhD, доцент*

Ответственный секретарь

Приходько Е. В., *к.т.н., профессор*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я., *д.т.н., профессор*
Новожилов А. Н., *д.т.н., профессор*
Никитин К. И., *д.т.н., профессор (Россия)*
Никифоров А. С., *д.т.н., профессор*
Новожилов Т. А., *к.т.н., доцент (Россия)*
Оспанова Н. Н., *к.п.н., доцент*
Нефтисов А. В., *доктор PhD, доцент*
Шокубаева З. Ж. *технический редактор*

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

***Ә. Б. Сағындық, А. Д. Тастенов**

Торайғыров университеті,
Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

ЕКІ СИММЕТРИЯЛЫ ЭЛЕКТРОНДЫ ЛИНЗАНЫҢ ПАРАКСИАЛДЫ ПАРАМЕТРЛЕРІН САНДЫҚ ЗЕРТТЕУ

Осы күнге дейін әлемде тиімді түзеуші және құрушы элементтер мен электронды және ионды оптика түйіндерін зерттеу мен жобалау бойынша жеткілікті түрде терең оңделмеген әдістемелер қолданылады. Бұл әсіресе тек екі өлшемді (осесимметриялық және жазықтық-симметриялық) зарядталған бөлшектер көздерінің барлық құрылғыларын қолдануда байқалады. Электронды және ионды оптиканың әртүрлі элементтерін зерттеу әдістері бір-бірінен ерекшеленеді. Мысалы, бірлік және қарапайым иммерсионды линзаларды зерттеу әдістері эмиссионды және шағылушы электронды линзалардың қасиеттерін зерттеу кезінде тиімді бола алмайды. Өз кезегінде, эмиссионды (катодты) линзалар теориясы мен электронды айналар теориясы да өзара ерекшеленеді. Сонымен қатар, ионды көздерді жобалау кезінде катодты линзалар теориясын қолдану да белгілі бір ерекшеліктерге ие болады. Кеңістіктік сипаттамалар мен фокустаушы өрістер симметриясының түрлері де маңызды мәнге ие. Бұл жағдайлар элементтердің әр түріне, олардың ерекшелігін ескере отырып, нақты теориялық негіздерді оңдеуді талап етеді. Әрі қарай бағдарламалық құралдар оңделіп, зерттеуші элементтер параметрлеріне есептеулер мен сандық нәтижелерге талдау жүргізілуі керек. Мақалада екі симметриялы жазықтыққа ие катодты электронды линзаның параксиалды параметрлері есептелген. Параксиалды жақындауда зарядталған бөлшектердің қозғалысы екінші ретті дифференциалды теңдеумен өрнектеледі. Жұмыста жаңартылған Эйлер әдісімен салыстырғанда мәні нақты мәнге жақынырақ болатын, яғни пайызбен өлшенетін салыстырмалы қателігі төменірек және тезірек есептелінетін төртінші ретті Рунге-Кутта әдісі жетік қарастырылған. Жүргізілген есептеу тәжірибесі негізінде Delphi ортасында есептеу бағдарламасы құрастырылған. Құрастырылған бағдарламаның көмегімен

зарядталған бөлшектердің қозғалыс траекториясының графиктері алынды. Зерттелуші линзамен қроссовердің құрылу шарты орындалуы үшін бірінші электродтың потенциалының электродтар арасындағы тесік өлшемінен тәуелділігі есептелді. Қроссовердің құрылу шарты болашақта абберрациялық коэффициенттерді есептеу үшін қажет.

Кілтті сөздер. Катодты линза, параксиалды параметрлер, дифференциалды теңдеу, Рунге-Кутт, оптикалық құрылғылар.

Кіріспе

Электронды-оптикалық және ионды-сәулелі құрылғылар мен құрылғылардың техникалық сипаттамалары көп жағдайда катодты линзаның фокусталу сапасына байланысты, өйткені онда зарядталған бөлшектердің сәулесін қалыптастыру процесі басталады. Фокустау параметрлерін жақсарту үшін симметрияның екі жазықтығы бар электронды линзаларды қолдану тиімді болып табылады. Бұл жұмыста екі симметриялы линзалар класына жататын қорап тәрізді катодты линзаның параксиалды қасиеттерін қарастырамыз.

Параксиалды параметрлерді есептеу әдістері

Зарядталған бөлшектердің параксиалды жуықтауын есептеу үшін біртекті екінші ретті дифференциалдық теңдеуді шешу қажет.

Біртекті екінші ретті дифференциалдық теңдеуді шешудің бірнеше әдістері бар, мысалы Эйлер әдісі, Рунге-Кутта және т.б.

Теңдеуді шешу үшін қажетті есептік жұмысты функция мәндерінің қажетті есептеулері мен дәлдігі бойынша өлшеу жалпы қабылданған.

$y'' = f(x, y, y')$ теңдеуін шешу үшін қажетті есептік жұмысты $f(x, y, y')$ функциясы мәндерінің қажетті есептеулері мен дәлдігі бойынша өлшеу қабылданған. [1] әдебиетте Рунге-Кутта әдісі жақсартылған Эйлер әдісімен салыстырғанда тек 40 % есептеулерді талап ететіні және төрт есе жоғары дәлдік беретіні көрсетілген.

Төртінші ретті Рунге-Кутта әдісінің келесі формасы бар

$$y_{k+1} = y_k + y'_k \cdot \Delta x + \frac{1}{6} \cdot (k_1 + k_2 + k_3) \cdot \Delta x \quad (1)$$

$$y'_{k+1} = y'_k + \frac{1}{6} \cdot (k_1 + 2 \cdot k_2 + 3 \cdot k_3 + k_4) \quad (2)$$

мұндағы

$$k_1 = f(x_k, y_k, y'_k) \cdot \Delta x \quad (3)$$

$$k_2 = f\left(x_k + \frac{\Delta x}{2}, y_k + y'_k \cdot \frac{\Delta x}{2}, y'_k + \frac{k_1}{2}\right) \cdot \Delta x \quad (4)$$

$$k_3 = f\left(x_k + \frac{\Delta x}{2}, y_k + y'_k \cdot \frac{\Delta x}{2} + \frac{k_1}{4} \cdot \Delta x, y'_k + \frac{k_2}{2}\right) \cdot \Delta x \quad (5)$$

$$k_3 = f\left(x_k + \Delta x, y_k + y'_k \cdot \Delta x + \frac{k_2}{4} \cdot \Delta x, y'_k + k_3\right) \cdot \Delta x \quad (6)$$

Осылайша, бұл Рунге-Кутта әдісі әр қадамда $y'' = f(x, y, y')$ теңдеуінің оң жағының төрт рет есептелуін қажет етеді.

Екі симметриялы электронды линзаның параксиалды параметрлерін сандық зерттеу нәтижелері

Параксиалды жуықтауда зерттелетін линзадағы зарядталған бөлшектердің қозғалысы келесі теңдеумен өрнектеледі

$$2 \cdot \Phi \cdot w_y'' + \Phi' \cdot w_y' - 2 \cdot \varphi_{02} \cdot w_y = 0 \quad (7)$$

мұндағы Φ – электростатикалық потенциалдың осьтік таралуы, ол [2] әдебиетінде анықталған.

$$\Phi(z) = \sum_{n=1}^{100} A_n \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot n - 1}{2 \cdot l_z} \cdot \pi \cdot z\right) \quad (8)$$

$$\varphi_{02}(z) = \frac{1}{2} \cdot \sum_{n=1}^{100} A_n \cdot \left(\frac{k_n}{l_y}\right)^2 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot n - 1}{2 \cdot l_z} \cdot \pi \cdot z\right) \quad (9)$$

(7) формуладағы w_y' -ті y -мен ауыстырып $w_y' = y$

Келесі теңдеуді аламыз

$$y' = -\frac{1}{2 \cdot \Phi} \cdot [\Phi' \cdot y - 2 \cdot \varphi_{02} \cdot w_y] \quad (10)$$

Бастапқы шарттары

$$\begin{cases} w_{y0} = 1 \\ w_y' = 0 \end{cases}$$

Берілген бастапқы шарттарда зарядталған бөлшектердің қозғалысының уақыты мен басқа параметрлері $\varphi_k = \varphi(x_k, y_k, z_k) = 0$ шарты орындалатын

катод бетінен шыққан сәттен бастап есептеледі. Сондықтан, (10) тендеуін есептеу кезінде белгісіздікке тап боламыз. Ол белгісіздікті Лопиталь ережесінің көмегімен жоюға болады.

$$w_y'' = -\frac{1}{3 \cdot \Phi'} \cdot [(\Phi'' - 2 \cdot \varphi_{02}') \cdot w_y' - 2 \cdot \varphi_{02}' \cdot w_y]. \quad (11)$$

Кесте 1 – $|w_y|=0$ шарты орындалатын параксиалды тендеуді есептеудің нәтижелері

U1	lx=0.06	lx=0.08	lx=0.1
-0.2	0.09274	0.10646	0.11626
-0.18	0.09490	0.10878	0.1187
-0.16	0.09726	0.1113	0.12132
-0.14	0.09985	0.11403	0.12416
-0.12	0.10271	0.11703	0.12727
-0.1	0.10592	0.12035	0.13068
-0.08	0.10955	0.12405	0.13446
-0.06	0.11373	0.12825	0.13870
-0.04	0.11866	0.13307	0.14350
-0.02	0.12468	0.13875	0.14907
0	0.13241	0.14564	0.15567
0.02	0.14332	0.15446	0.16379
0.04	0.16313	0.16686	0.17441
0.06		0.18921	0.19008

Қорытынды

Параксиалды жуықтауды есептеу үшін мақалада Коши есебінің жуықталған шешімін табу әдісі қолданылады, ол кез келген сандық әдістерге қарағанда әлдеқайда дәл және тәжірибеде кеңінен қолданылады.

Рунге-Кутта әдісі әр қадамда төрт есептеуді қажет етеді. Сондықтан есептеуді жеңілдету үшін есептеу эксперименті негізінде Delphi ортасында бағдарлама жасалды. Бағдарламаны қолдана отырып, біз зерттелетін линзаның кроссоверінің пайда болу шарты орындалатын электродтар арасындағы z1 саңылауының өлшеміне u1 бірінші электрод потенциалының тәуелділігін алдық (1-кесте). Кроссовердің пайда болу шарты барлық дерлік электронды-оптикалық құрылғылар мен ионды-сәулелік қондырғылардың негізгі элементі болып табылатын электронды зеңбіректер мен ион көздерін жобалау үшін қажет. Алынған нәтижелер негізінде зерттелетін линзаның абберациялық коэффициенттері де есептелді, бұл симметрияның екі жазықтығы бар катодты линзаларды қолданудың болашағы зор екенін көрсетті.

ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1 **Эдвардс, Ч. Г.** Дифференциальные уравнения и краевые задачи: моделирование и вычисление с помощью Mathematica, Maple и MATLAB. 3-е издание. : Пер. с англ./ Ч. Г. Эдвардс, Д. Э. Пенни – М., 2008. – 1104 с.

2 **Ибраев, А. Т.** Решение задачи Дирихле для электростатических линз с двумя плоскостями симметрии / А. Т. Ибраев, А. Сагындык // Труды II Международной научно-практической конференции «Информационные и телекоммуникационные технологии : образование, наука, практика». – Алматы : Казахстан, 2015. – С.155 -159.

3 **Ibraev, A. T., Sagyndyk, A.** The solution the Dirichlet problem for electrostatic lens with two symmetry planes // II Proceedings of the International scientific-practical conference «Information and telecommunication technologies : education, science and practice». – Almaty, Kazakhstan. – 2015. – P. 155

4 **Ibrayev, A. T.** Theory of Cathode Lens with Multipole Components of Electrostatic Field and the Space Charge // Microscopy and Microanalysis. – 2015. – V. 21. – № 6. – P. 270–275.

5 **Szilagyi, M.** Electron and Ion Optics. – М. : Mir, 1990. – 639 p.

6 **Tóth, L., Matsuda, H., Shimizu, T., Matsui, F., and Daimon, H.** New simple photoemission electron microscope with an energy filter // J. Vac. Soc. Jpn., 51(3). – 2008. – P. 135–137. – DOI: 10.3131/jvsj2.51.135

7 **Tóth, L., Matsuda, H., and Daimon, H.** Simple method for making deeply curved mesh // J. Electron Spectrosc. Rel. Phenomena, 171. – 2009. – P. 64–67. – DOI: 10.1016/j.elspec.2009.02.013

8 **Tóth, L., Goto, K., Matsuda, H., Matsui, F., and Daimon, H.** New 1π sr acceptance angle display-type ellipsoidal mesh analyzer for electron energy and two-dimensional angular distribution as well as imaging analysis // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, Accel., Spectrometers, Detectors Assoc. Equip., 648. – 2011. – P. 58–S59. – DOI: 10.1016/j.nima.2010.12.192

9 **Tóth, L., Matsuda, H., Matsui, F., Goto, K., and Daimon, H.** Details of 1π sr wide acceptance angle electrostatic lens for electron energy and two-dimensional angular distribution analysis combined with real space imaging, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, Accel., Spectrometers, Detectors Assoc. Equip., 661(1). – 2012. – P. 98–105. – DOI: 10.1016/j.nima.2011.09.018

10 **Matsuda H. et al.** Development of display-type ellipsoidal mesh analyzer: Computational evaluation and experimental validation // J. Electron Spectrosc. Rel. Phenomena, 195. – 2014). – P. 382–398. – DOI: 10.1016/j.elspec.2014.05.001

REFERENCES

1 **Edwards, Ch. G.** *Differencial'nye uravneniya i kraevye zadachi : modelirovanie i vychislenie s pomoshch'yu Mathematica, Maple i MATLAB.* 3-e izdanie. : Per. s angl./ Ch. G. Edwards, D. E. Penni [Differential equations and boundary value problems : modeling and computation using Mathematica, Maple and MATLAB. 3rd edition. : Per. from English / C. G. Edwards, D. E. Penny]. – Moscow, 2008. —1104 p.

2 **Ibraev, A. T.** Reshenie zadachi Dirihle dlya elektrostatičeskikh linz s dvumya ploskostyami simmetrii / A. T. Ibraev, A. Sagyndyk [Solution of the Dirichlet problem for electrostatic lenses with two planes of symmetry / A. T. Ibraev, A. Sagyndyk. In Trudy II Mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferencii «Informacionnye i telekommunikacionnye tekhnologii: obrazovanie, nauka, praktika» [Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference «Information and Telecommunication Technologies : Education, Science, Practice»]. – Almaty, Kazakhstan, 2015. – P. 155–159.

3 **Ibraev, A. T., Sagyndyk, A.** The solution the Dirichlet problem for electrostatic lens with two symmetry planes. In II Proceedings of the International scientific-practical conference «Information and telecommunication technologies : education, science and practice». – Almaty, Kazakhstan. – 2015. – P. 155.

4 **Ibrayev, A. T.** Theory of Cathode Lens with Multipole Components of Electrostatic Field and the Space Charge. In *Microscopy and Microanalysis.* – 2015. – V. 21. – № 6. – P. 270–275.

5 **Szilagyi, M.** *Electron and Ion Optics.* – Moscow : Mir, 1990. – 639 p.

6 **Tóth, L., Matsuda, H., Shimizu, T., Matsui, F., and Daimon, H.** New simple photoemission electron microscope with an energy filter. In *J. Vac. Soc. Jpn.*, 51(3). – 2008. – P. 135–137. – DOI: 10.3131/jvsj2.51.135

7 **Tóth, L., Matsuda, H., and Daimon, H.** Simple method for making deeply curved mesh. In *J. Electron Spectrosc. Rel. Phenomena*, 171. – 2009. – P. 64–67. – DOI: 10.1016/j.elspec.2009.02.013

8 **Tóth, L., Goto, K., Matsuda, H., Matsui, F., and Daimon, H.** New 1π sr acceptance angle display-type ellipsoidal mesh analyzer for electron energy and two-dimensional angular distribution as well as imaging analysis. In *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, Accel., Spectrometers, Detectors Assoc. Equip.*, 648. – 2011. – P. 58–S59. – DOI: 10.1016/j.nima.2010.12.192

9 **Tóth, L., Matsuda, H., Matsui, F., Goto, K., and Daimon, H.** Details of 1π sr wide acceptance angle electrostatic lens for electron energy and two-dimensional angular distribution analysis combined with real space imaging, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, Accel., Spectrometers, Detectors Assoc. Equip.*, 661(1). – 2012. – P. 98–105. DOI: 10.1016/j.nima.2011.09.018.

10 **Matsuda, H. et al.** Development of display-type ellipsoidal mesh analyzer : Computational evaluation and experimental validation. In J. Electron Spectrosc. Rel. Phenomena, 195. – 2014. – P. 382–398. – DOI: 10.1016/j.elspec.2014.05.001

Материал 28.08.21 баспаға түсті.

*А. Б. Сағындық, А. Д. Тастенов
Торайгыров университет,
Республика Казахстан, г. Павлодар.
Материал поступил в редакцию 28.08.21.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАКСИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛИНЗ С ДВУМЯ ПЛОСКОСТЯМИ СИММЕТРИИ

До сих пор в мире используются недостаточно глубоко разработанные методики по исследованию и проектированию эффективных корректирующих и формирующих элементов и узлов электронной и ионной оптики. Особенно это заметно в использовании практически во всех устройствах только двумерных (осесимметричных и плоско-симметричных) источников заряженных частиц. Методы исследования различных элементов электронной и ионной оптики заметно отличаются. Например, метод исследования одиночных и обычных иммерсионных линз не может быть эффективным при исследовании свойств эмиссионных и отражающих электронных линз. В свою очередь, теория эмиссионных (катодных) линз и теория электронных зеркал также отличается. Кроме того, использование теории катодных линз при проектировании ионных источников тоже имеет особенности. Важное значение имеют также пространственные характеристики и типы симметрий фокусирующих полей. Эти обстоятельства требуют разработки конкретной теоретической основы исследования каждого типа элементов с учетом их специфики. Дальше должны быть разработаны программные средства и проведены расчеты параметров исследуемых элементов и выполнен анализ численных результатов. В статье выполнен расчет параксиальных параметров катодной электронной линзы с двумя плоскостями симметрии. В параксиальном приближении движение заряженных частиц удовлетворяет дифференциальному уравнению второго порядка. В работе детально рассматривается метод Рунге-Кутты четвертого

порядка, который является более точным, то есть имеет меньшую относительную ошибку, вычисленную в процентах и вычисляется быстрее чем усовершенствованный метод Эйлера. На основе проведенного вычислительного эксперимента была разработана программа в среде Delphi, с помощью которой получены графики траектории заряженных частиц. Получены зависимости потенциала первого электрода U_1 от размера щели z_1 между электродами, при которых выполняется условие формирования кроссовера исследуемой линзой. Условие формирования кроссовера необходима для дальнейшего расчета абберационных коэффициентов.

Ключевые слова: катодная линза, параксиальные параметры, дифференциальное уравнение, Рунге-Кутта, оптические приборы.

*A. B. Sagyndyk, A. D. Tastenov
Toraighyrov University,
Republic of Kazakhstan, Pavlodar.
Material received on 28.08.21.

NUMERICAL INVESTIGATION INTO THE PARAXIAL PARAMETERS OF ELECTRONIC LENSES WITH TWO SYMMETRY PLANES

Until now, insufficiently deeply developed methods for the study and design of effective correcting and forming elements and units of electronic and ionic optics are used in the world. This is especially noticeable in the use of only two-dimensional (axisymmetric and plane-symmetric) sources of charged particles in almost all devices. The research methods for various elements of electronic and ionic optics differ noticeably. For example, the method of studying single and conventional immersion lenses cannot be effective in studying the properties of emissive and reflective electronic lenses. In its turn, the theory of emission (cathode) lenses and the theory of electron mirrors are also different. In addition, the use of the theory of cathode lenses in the design of ion sources also has specific features. The spatial characteristics and types of symmetries of focusing fields are also important. These circumstances require the development of a specific theoretical basis for the study of each type of elements, taking into account their specificity. Further, software should be developed and the parameters of the studied elements should be calculated and the analysis of the numerical results should be performed. In this paper, the calculation of the paraxial parameters of cathode electron lenses with

two planes of symmetry is performed. In the paraxial approximation, the motion of charged particles satisfies the differential equation of the second order. This study discusses the Runge-Kutta method of the fourth order, which is more accurate, i.e. has a smaller relative error, calculated in percentage and is computed faster than the improved Euler method. On the basis of the computational experiment the program on delphi, with the help of which the trajectory diagrams of charged particles were obtained. The dependences of the potential of the first electrode u_1 on the size of the gap z_1 between the electrodes are found, in which the condition of the formation of a crossover of the investigated lens is satisfied. The condition for the formation of a crossover is needed for the further calculation of the aberration coefficients.

Keywords: cathode lens, paraxial parameters, differential equation, Runge-Kutta, optical devices.

Теруге 28.08.2021 ж. жіберілді. Басуға 11.09.2021 ж. қол қойылды.

Электрондық баспа

2,69 Mb RAM

Шартты баспа табағы 8,11. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: З. С. Исакова

Корректор: А. Р. Омарова

Тапсырыс № 3847

Сдано в набор 28.08.2021 г. Подписано в печать 11.09.2021 г.

Электронное издание

2,69 Mb RAM

Усл. печ. л. 8,11. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: З. С. Исакова

Корректор: А. Р. Омарова

Заказ № 3847

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

«Торайғыров университет»

коммерциялық емес акционерлік қоғамы

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

«Торайғыров университет»

коммерциялық емес акционерлік қоғамы

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

8 (7182) 67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz