

УДК 621.386.22

## ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ФОКУСИРОВКИ МИКРОФОКУСНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКИ

**М. В. Блудов**, аспирант РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0009-0004-1811-0344, email: bludovmaksim@rambler.ru

**Е. Ю. Грачев**, к.т.н., доцент кафедры ПЭл РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/ 0000-0001-7813-7769, email: monopol\_rus@mail.ru

**А. А. Трубицын**, д.ф.-м.н., профессор кафедры ПЭл РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0002-9337-8947, e-mail: assur@bk.ru

*Проведено исследование электронно-оптической схемы микрофокусной рентгеновской трубы пристрельного типа с электромагнитной фокусировкой, состоящей из трех последовательно размещенных магнитных линз. Для оценки результатов проведен расчет матричным методом, одним из наиболее эффективных методов анализа и синтеза электронно-оптических систем. Целью работы является исследование и определение режимов работы линз, обеспечивающих микронный диаметр фокального пятна электронного потока на аноде трубы в режиме полного токопрохождения при ускоряющем потенциале 100 кВ.*

**Ключевые слова:** рентгеновская трубка, электромагнитная фокусировка, матричный метод, магнитная линза, электронная оптика.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2025-94-177-188

### Введение

Применение микрофокусных трубок, в отличие от макрофокусных, в рентгеновских установках обеспечивает ряд важных преимуществ – компактность оборудования, пониженную радиационную нагрузку на изучаемый объект и обслуживающий персонал, возможность локальных исследований, возможность получения увеличенных изображений, повышенные информативность и качество снимков [1, 2].

Преимущества микрофокусной рентгенографии проявляются тем сильнее, чем меньше размеры фокусного пятна.

Задачи управления электронными потоками решает электронная оптика. Эти задачи включают в себя вопросы формирования, транспортировки, фокусировки и отклонения пучков заряженных частиц.

Электронная оптика является сравнительно молодой «отраслью» прикладной физики, выросшей в самостоятельную обширную дисциплину. Она получила свое название вследствие известной аналогии между оптическими явлениями и явлениями распространения электронных потоков в электромагнитных полях.

Исторически первыми объектами электронной оптики стали электронные линзы. Интерес к развитию теории и практики применения электронных линз не прекращается уже многие десятилетия.

Электростатическая катодная линза, в технических приложениях называемая катодно-модуляторным (КМУ) узлом, служит для начального ускорения электронов и формирования промежуточного фокуса. Дальнейшее формирование фокусного пятна малых размеров в эмиссионных системах, в том числе в современных микрофокусных рентгеновских трубках, обеспечивается последовательно размещенными электрической и магнитной фокусирующими системами. При построении магнитных фокусирующих систем используют одну либо последовательность нескольких линз.

В электронно-оптических системах основным способом достижения фокусного пятна малых размеров является использование промежуточных и выходных диафрагм, ограничивающих угловые и геометрические размеры сфокусированного электронного потока [3]. Однако такой способ минимизации размеров пятна приводит к снижению тока электронов и, как следствие, мощности трубки. В данной работе исследуется фокусирующая система рентгеновской трубки, состоящая из трех магнитных линз. Поставленная задача минимизации диаметра фокусного пятна решается в условиях без и с ограничением тока эмиссии. Конкретной целью исследований является разработка трехлинзовой электронно-оптической системы (ЭОС), обеспечивающей фокусное пятно микронных размеров.

Разрабатываемая ЭОС рентгеновской трубки предназначена для просвечивающей диагностики твердотельных объектов электроники и микроэлектроники, поэтому величина ускоряющего напряжения должна быть порядка  $U_a = 100$  кВ. В микрофокусных трубках ток эмиссии используемых прямонакальных катодов  $I_e$  может составлять несколько мА, и поэтому микроперванс  $\frac{I_e}{U_a^{3/2}} 10^6$  не превосходит величины  $10^{-4} - 10^{-3}$  А/В<sup>3/2</sup>, что позволяет моделировать поведение заряженных частиц в этих приборах без учета пространственного заряда [4].

### Методы исследования

Электронно-оптическая схема рентгеновской трубы рассчитывалась в геометрическом приближении, т.е. использовались методы и законы геометрической оптики [5, 6]. Для определения оптимального положения линз использовался метод последовательных приближений. В качестве способа проверки и сравнения полученных результатов использовались расчеты матричным методом [7].

### Система фокусировки

Для тонкой фокусировки пучка электронов в эмиссионных системах обычно применяют последовательность магнитных линз. Чаще используют катушки с током (соленоиды) (рисунок 1), чем постоянные магниты, поскольку в этом случае значительно проще регулировать фокусное расстояние за счет изменения тока.

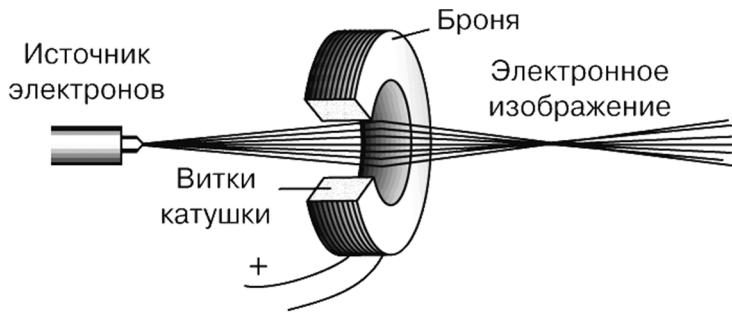


Рисунок 1 – Схематическое изображение магнитной линзы на основе электромагнита

Figure 1 – Schematic representation of magnetic lens based on electromagnet

### Исследование распространения луча в системе тонких линз

В типовых конструкциях рентгеновских трубок для формирования фокусного пятна на мишени анода применяется одиночная магнитная линза, однако использование системы из трех последовательно размещенных линз позволяет достичь лучшей фокусировки и уменьшить диаметр фокусного пятна. Рассмотрим распространение параксиального луча через оптическую систему, состоящую из трех преломляющих поверхностей (рисунок 5), каждая из которых представляет собой тонкую линзу (I, II, III). Высота предмета  $H$  задается диаметром первичного кроссовера, сформированного в КМУ, содержащем катод, электрод Венельта и

анод. В оптимальном режиме работы катода из гексаборида лантана ( $\text{LaB}_6$ ) по результатам численного моделирования [4, 8] получен диаметр кроссовера 26,5 мкм.

Установим оптимальное местоположение каждой из тонких линз. Длину оптической системы ограничим протяжённостью ЭОС микрофокусной рентгеновской трубы [4]. Она будет определяться расстоянием от первичного кроссовера до мишени.

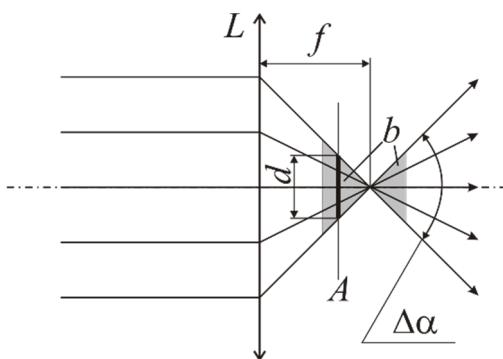
Сначала определим положение третьей линзы. Здесь необходимо учитывать теорему Гельмгольца – Лагранжа:

$$\Gamma \cdot M = \sqrt{\frac{E_c}{E_a}}, \quad (1)$$

где  $E_c$  и  $E_a$  – энергии электронов на катоде и аноде соответственно, а отношение  $E_a/E_c$  – ускорение электронно-оптической системы;  $\Gamma$  – ее угловое увеличение,  $M$  – линейное увеличение. Главный вывод, следующий из (1), заключается в обратной пропорциональности углового и линейного увеличений при конкретной величине ускорения системы, т.е.

$$M \sim \frac{1}{\Gamma}.$$

Поэтому для сокращения размеров фокусного пятна (уменьшения  $M$ ) нужно увеличивать угловой разброс электронов при подлете к поверхности анода. Угловой разброс  $\Delta\alpha$  потока после прохождения линзы  $L$  зависит от ее фокусного расстояния  $f$  – чем меньше фокусное расстояние, тем больше угловой разброс в точке фокуса (рисунок 2).



**Рисунок 2 – Демонстрация связи между фокусным расстоянием  $f$ , угловым разбросом  $\Delta\alpha$  и диаметром  $d$  электронного пятна на аноде  $A$  в линзе  $L$ :**  
 **$b$  – область случайных изменений фокусного расстояния**

**Figure 2 – Demonstration of relationship between focal length  $f$ , angular spread  $\Delta\alpha$  and diameter  $d$  of electron spot on anode  $A$  in lens  $L$ :  $b$  – region of random variations in focal length**

В работе [4] обосновано оптимальное фокусное расстояние, которое примем в качестве первого приближения при выборе положения и фокусного расстояния третьей линзы в данной работе. В реальных линзах для концентрации магнитного поля применяют ферромагнитные экраны (панцирные магнитные линзы). Обычно толщина их стенок составляет 5-8 мм. С учётом данного ограничения зададим минимально допустимое расстояние между второй и третьей линзами равным 20 мм, что обеспечит возможность размещения двух панцирных магнитных линз рядом на пролетной трубе. Ввиду ограниченности длины оптической системы дальнейшее увеличение этого промежутка нецелесообразно, поскольку приведёт к смещению положения линз и, как следствие, к росту результирующего размера фокусного пятна. Поэтому вторую линзу разместим на расстоянии 20 мм от третьей.

При выбранном выше расположении и фокусном расстоянии третьей линзы и аналогичных параметрах первой линзы найдем зависимость высоты изображения от фокусного расстояния второй линзы. Результаты представлены на рисунке 3. Минимальная высота изображения  $h = 5,81$  мкм наблюдается при  $f_2 = 28$  мм.

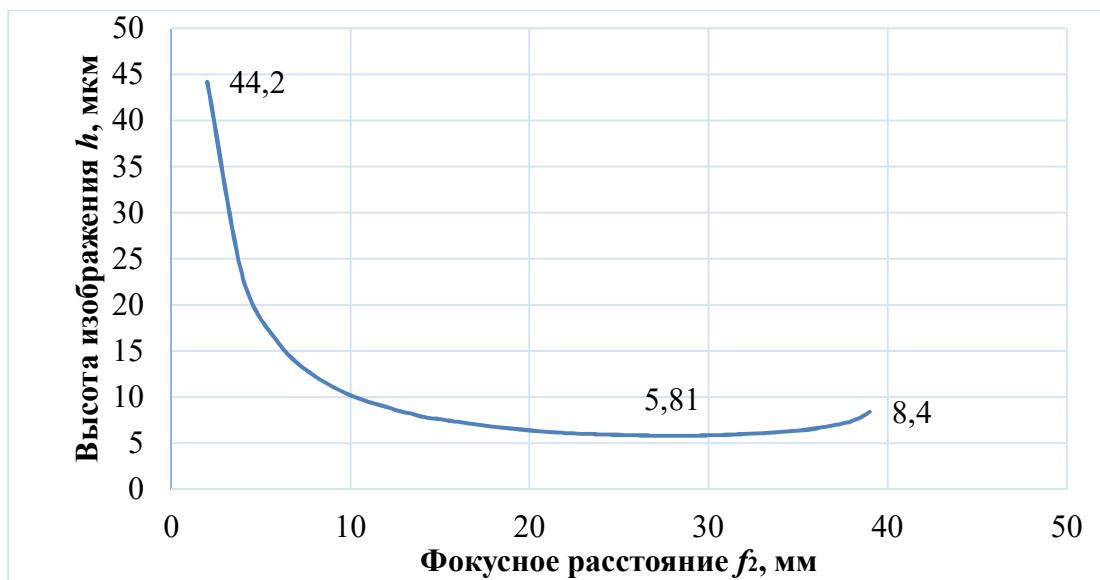


Рисунок 3 – Зависимость высоты изображения  $h$  от величины фокусного расстояния второй тонкой линзы  $f_2$

Figure 3 – Dependence of image height  $h$  on focal length of second thin lens  $f_2$

Далее находим высоты изображения от фокусного расстояния первой линзы  $f_1$ , оставив  $f_3$  прежним и используя полученное выше  $f_2 = 28$  мм. Поскольку необходимо получить микронное изображение предмета, то положение первой линзы в оптической системе должно удовлетворять условию  $a_1 > 2f_1$ . В таком случае изображение является действительным и уменьшенным. На рисунке 4 приведена полученная зависимость высоты изображения  $h$  от величины фокусного расстояния первой линзы  $f_1$ . Учитывая практические и конструктивные ограничения фокусного расстояния магнитной линзы по нижнему пределу, примем  $f_1 = 13,3$  мм ( $h = 4,78$  мкм).

Таким образом, при найденных параметрах линз минимальная высота изображения (диаметр фокусного пятна) составила 4,78 мкм. Результирующая ЭОС с указанием основных параметров представлена на рисунке 5.

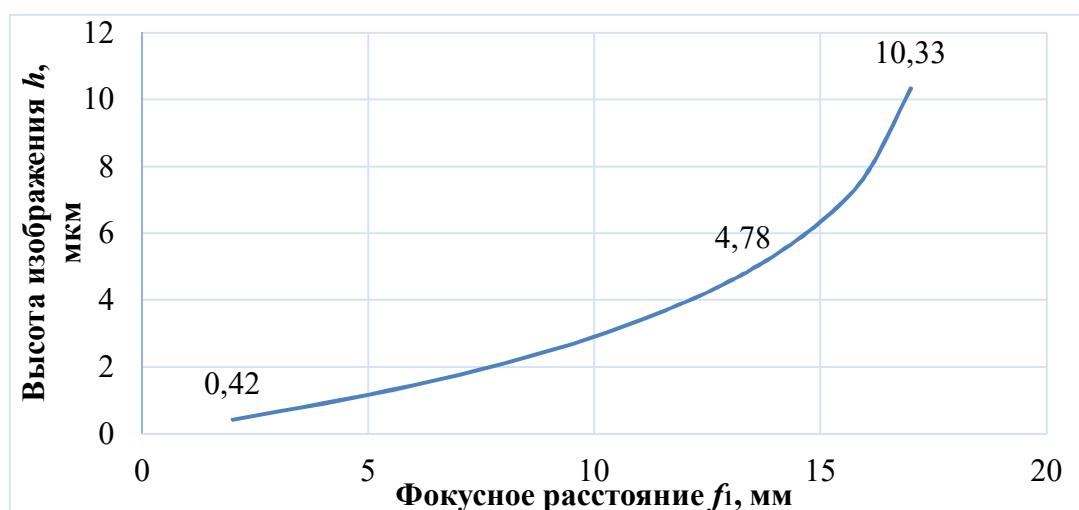


Рисунок 4 – Зависимость высоты изображения  $h$  от величины фокусного расстояния первой тонкой линзы  $f_1$

Figure 4 – Dependence of image height  $h$  on focal length of first thin lens  $f_1$

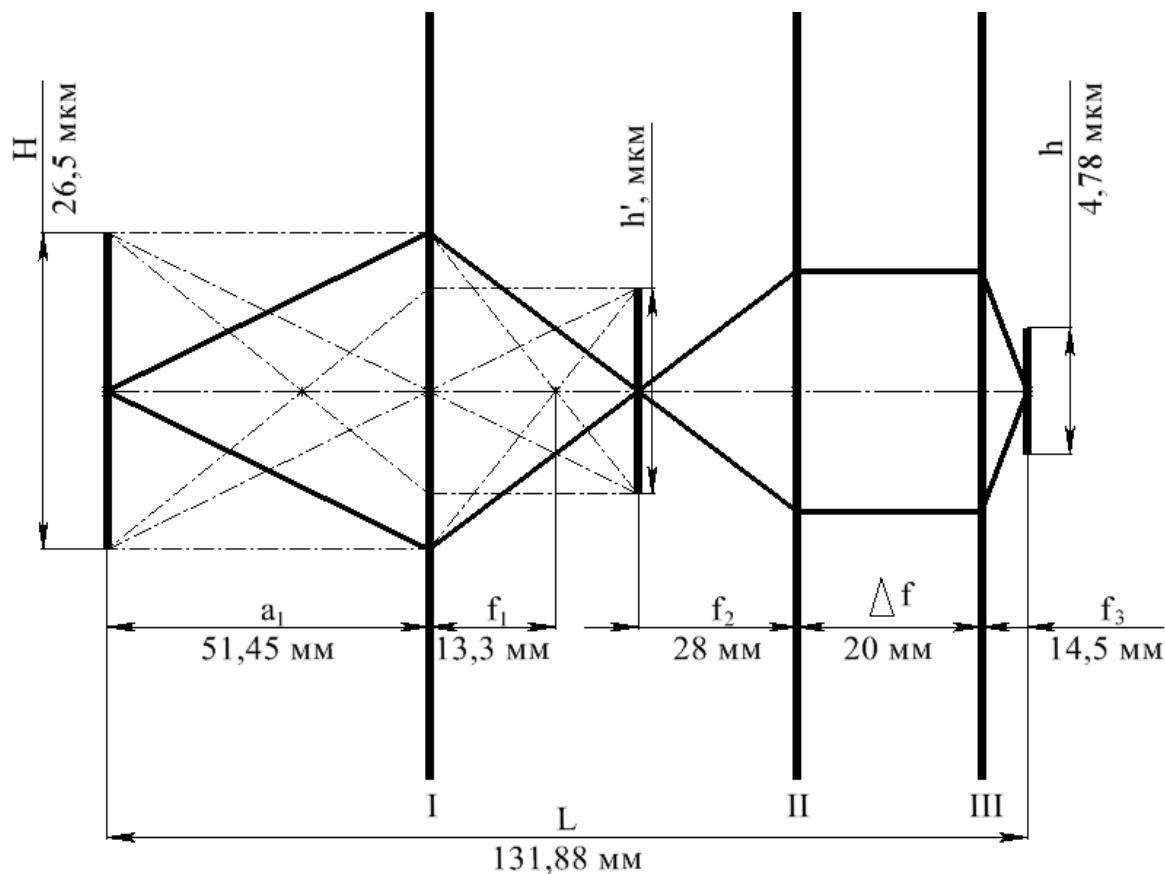


Рисунок 5 – Оптическая система:  $H$  – высота предмета,  $h'$  – промежуточная высота,  $h$  – высота изображения,  $a_1$  – расстояние от предмета до первой линзы,  $f_1, f_2, f_3$  – фокусные расстояния тонких линз,  $L$  – длина оптической системы, I, II, III – тонкие линзы

Figure 5 – Optical system:  $H$  – object height,  $h'$  – intermediate height,  $h$  – image height,  $a_1$  – distance from the object to the first lens,  $f_1, f_2, f_3$  – focal length of a thin lens,  $L$  – optical system length, I, II, III – thin lenses

#### Исследование ЭОС матричным методом

В параксиальной оптике для расчетов систем электромагнитной фокусировки с точки зрения вычислительных затрат экономичным является матричный метод, позволяющий заменить ряд громоздких соотношений между входными и выходными параметрами матрицей. Матричный метод используется для геометрического построения изображений в системе линз, состоящей из последовательности сферических преломляющих поверхностей, центры которых расположены на одной оптической оси. Для анализа системы матричным методом делаются два главных допущения [9]:

1. Длина волны света считается пренебрежимо малой и распространение света можно описывать с помощью отдельных лучей, а не на языке волновых фронтов. Причем лучи подчиняются принципу наименьшего времени Ферма.

2. Рассматриваются лишь параксиальные лучи, которые при прохождении через оптическую систему остаются близкими к ее оси симметрии и почти параллельными ей. Это позволяет для синусов и тангенсов любых углов, образуемых этими лучами с оптической осью, использовать первый порядок разложения в ряд. Поэтому эффекты третьего порядка (сферическая аберрация, кома, астигматизм, кривизна поля и дисторсия), исключаются из исследования.

Для построения матрицы введем систему декартовых координат (рисунок 6): ось  $z$ , совпадающую с оптической осью системы, а также с главным направлением, вдоль которого распространяются лучи света, направленную слева направо; ось  $y$ , расположенную в плоско-

сти рисунка и направленную вверх, ось  $x$ , перпендикулярную к плоскости  $yz$ . Будем рассматривать лучи, лежащие в плоскости  $yz$  в непосредственной близости от оси  $z$ .

Поскольку луч проходит через различные преломляющие поверхности системы, его траектория состоит из последовательности прямых линий. Каждая из них определяется координатами одной принадлежащей ей точки и углом относительно оси  $z$ . Выберем заранее любую плоскость  $z = \text{const}$ , перпендикулярную к оси  $z$ , называемую опорной плоскостью (ОП). Тогда положение луча относительно ОП можно определить двумя параметрами: высотой  $y$ , на которой он пересекает опорную плоскость, и углом относительно оси  $z$ . Угол  $v$  измеряется в радианах и считается положительным, если соответствует вращению против часовой стрелки от положительного направления оси  $z$  к направлению, в котором свет распространяется вдоль луча. Для расчетов удобнее заменить угол луча  $v$  соответствующим ему оптическим направляющим косинусом  $V = nv$  (точнее говоря,  $V = n \cdot \sin v$ ), где  $n$  – показатель преломления среды, в которой распространяется луч, так как согласно закону Снеллиуса оптический направляющий косинус остается неизменным при пересечении граничной поверхности двух оптически различных сред [9].

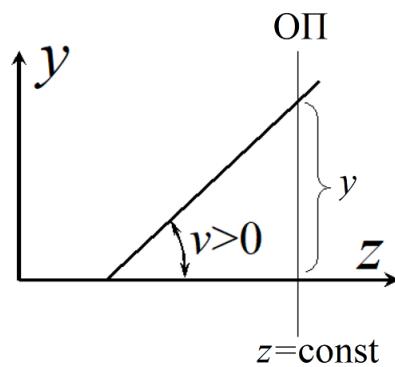


Рисунок 6 – Система координат при исследовании  
Figure 6 – Coordinate system during the study

Поскольку луч проходит через систему преломляющих линз, то для исследования его поведения необходимо рассмотреть только два основных процесса [9].

1. Перемещение между двумя преломляющими поверхностями. Здесь луч, проходит по прямой линии от одной преломляющей поверхности к другой. Область между поверхностями характеризуется ее толщиной  $t$  и показателем преломления  $n$  среды, через которую проходит луч.

2. Преломление на граничной поверхности между двумя областями с различными показателями преломления.

Рассмотрим, как эти два процесса влияют на значения величин  $y$  и  $V$  луча при его движении от одной опорной плоскости к другой, между которыми находится оптический элемент. Вначале луч пересекает ОП<sub>1</sub>, имея на ней значения параметров  $y_1$  и  $V_1$ . Затем он проходит через оптический элемент и, достигает ОП<sub>2</sub>, на которой характеризуется высотой  $y_2$  и углом  $V_2$ . Уравнения, отображающие зависимость между входными и выходными параметрами при перемещении и преломлении луча между двумя ОП можно записать в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} y_2 \\ V_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ V_1 \end{pmatrix},$$

где  $y_1, y_2$  – точки пересечения оси  $y$ ; а  $V_1, V_2$  – оптические направляющие косинусы ( $V = n \cdot \sin v$ ) на входе и выходе центрированной системы линз соответственно;  $A, B, C, D$  – матричные элементы.

Стоит отметить, что определитель матрицы должен удовлетворять условию  $AD - BC = 1$  [9].

Таким образом, каждому элементу оптической системы можно поставить в соответствие матрицу преобразования лучей. Для вычисления итоговой матрицы, отражающей свойства системы в целом, требуется выполнить последовательное умножение матриц всех элементарных преобразований (перемещений и преломлений), имеющихся в системе, соблюдая правильную последовательность. Данный принцип универсален: он подходит как для простейших систем (одиночная тонкая линза), так и для сложных оптических конфигураций.

Воспользуемся матричным методом для оценки результатов, полученных ранее. Поскольку линзы считаем тонкими, то оптические промежутки между преломляющими поверхностями пренебрежимо малы, и поэтому матрица перемещения через такой промежуток вырождается в единичную матрицу. Зададим опорные плоскости в местах расположения линз (рисунок 7).

Исходные данные для матричного расчета отражены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные

Table 1 – Initial data

Параметр	Значение
Фокусное расстояние первой линзы	$f_1 = 13,3$ мм
Фокусное расстояние второй линзы	$f_2 = 28$ мм
Фокусное расстояние третьей линзы	$f_3 = 14,5$ мм
Расстояние от предмета до первой линзы	$a_1 = 51,45$ мм
Расстояние между второй и третьей линзами	$\Delta f = 20$ мм
Расстояние между первой линзой и точкой промежуточной фокусировки	$a_2 = 17,94$ мм
Диаметр кроссовера после первичной фокусировки электродом Венельта	$y_1 = H = 0,0265$ мм
Начальный угол луча	$V_1 = 0,00258$ рад
Длина ЭОС	$L = 131,88$ мм

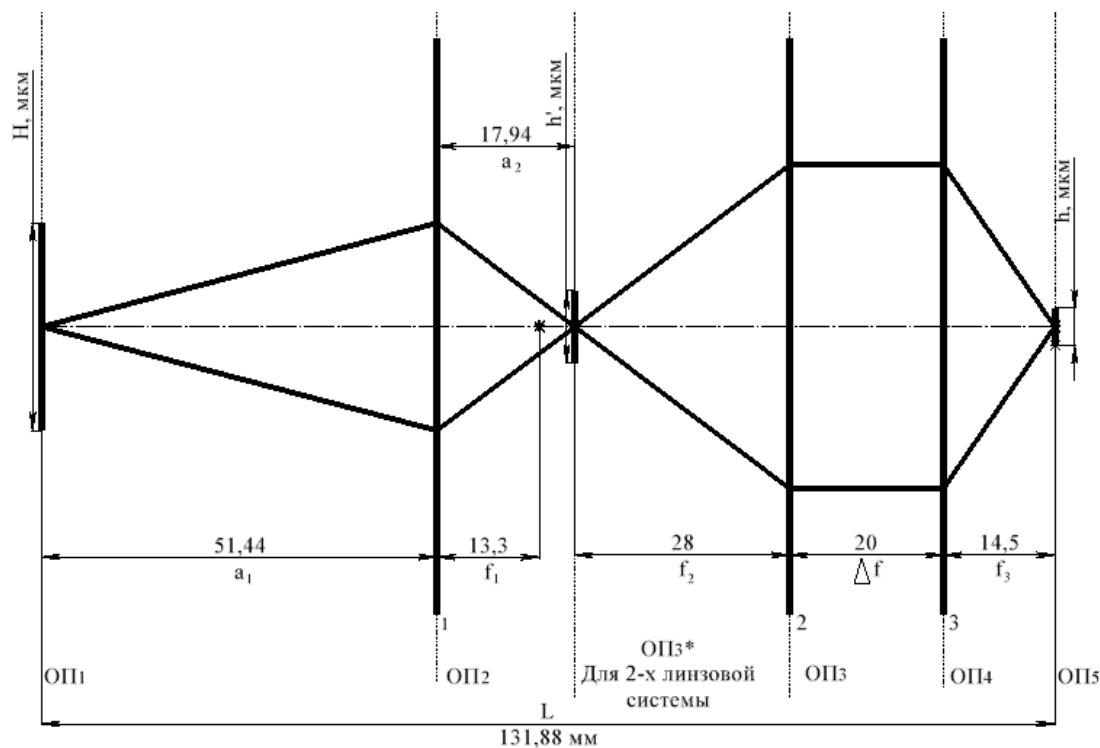


Рисунок 7 – Оптическая система с опорными плоскостями  
Figure 7 – Optical system with reference planes

Выполним расчет матричным методом для трех случаев с различным числом тонких линз. Отметим, что запись промежуточных матриц идет в обратном порядке.

*1. Оптическая система из трех тонких линз*

Запишем последовательность матриц перемещения и преломления луча, соответствующую цепочке элементов от  $O\Gamma_5$  до  $O\Gamma_1$ :

$$\mathbf{M}_7 = \begin{pmatrix} 1 & \mathbf{f}_3 \\ \mathbf{0} & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{M}_6 = \begin{pmatrix} 1 & \mathbf{0} \\ -\frac{1}{\mathbf{f}_3} & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{M}_5 = \begin{pmatrix} 1 & \Delta\mathbf{f} \\ \mathbf{0} & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{M}_4 = \begin{pmatrix} 1 & \mathbf{0} \\ -\frac{1}{\mathbf{f}_2} & 1 \end{pmatrix}$$

Перемещение      Преломление      Перемещение      Преломление  
от  $O\Gamma_5$  до  $O\Gamma_4$       на  $O\Gamma_4$       от  $O\Gamma_4$  до  $O\Gamma_3$       на  $O\Gamma_3$

$$\mathbf{M}_3 = \begin{pmatrix} 1 & \mathbf{f}_2 + \mathbf{a}_2 \\ \mathbf{0} & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{M}_2 = \begin{pmatrix} 1 & \mathbf{0} \\ -\frac{1}{\mathbf{f}_1} & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{M}_1 = \begin{pmatrix} 1 & \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{0} & 1 \end{pmatrix}.$$

Перемещение      Преломление      Перемещение  
от  $O\Gamma_3$  до  $O\Gamma_2$       на  $O\Gamma_2$       от  $O\Gamma_2$  до  $O\Gamma_1$

Найдем результирующую матрицу  $M_{III}$ :

$$\mathbf{M}_{III} = \mathbf{M}_7 \cdot \mathbf{M}_6 \cdot \mathbf{M}_5 \cdot \mathbf{M}_4 \cdot \mathbf{M}_3 \cdot \mathbf{M}_2 \cdot \mathbf{M}_1 = \begin{pmatrix} 0,181 & 4,906 \cdot 10^{-3} \\ 0,165 & 5,54 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{pmatrix}.$$

Для контроля правильности вычислений найдем определитель матрицы  $M_{III}$ :

$$\det M_{III} = AD - BC = 1.$$

Для связи предмета с изображением верхний правый элемент  $B$  результирующей матрицы должен быть равен нулю [9]. Тогда получаем:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{y}_2 \\ \mathbf{V}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,181 & \mathbf{0} \\ 0,165 & 5,54 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{V}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4,796 \cdot 10^{-3} \text{ мм} \\ 0,019 \text{ рад} \end{pmatrix}.$$

Таким образом, получена высота изображения 4,796 мкм при угле падения 19 мрад.

*2. Оптическая система из двух тонких линз*

Запишем последовательность матриц перемещения и преломления луча, соответствующую их цепочке элементов от  $O\Gamma_5$  до  $O\Gamma_3^*$ :

$$\mathbf{M}_7 = \begin{pmatrix} 1 & \mathbf{f}_3 \\ \mathbf{0} & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{M}_6 = \begin{pmatrix} 1 & \mathbf{0} \\ -\frac{1}{\mathbf{f}_3} & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{M}_5 = \begin{pmatrix} 1 & \Delta\mathbf{f} \\ \mathbf{0} & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{M}_4 = \begin{pmatrix} 1 & \mathbf{0} \\ -\frac{1}{\mathbf{f}_2} & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{M}_3^* = \begin{pmatrix} 1 & \mathbf{f}_2 \\ \mathbf{0} & 1 \end{pmatrix}.$$

Перемещение      Преломление      Перемещение      Преломление      Перемещение  
от  $O\Gamma_5$  до  $O\Gamma_4$       на  $O\Gamma_4$       от  $O\Gamma_4$  до  $O\Gamma_3$       на  $O\Gamma_3$       от  $O\Gamma_3$  до  $O\Gamma_3^*$

Найдем результирующую матрицу  $M_{II}$ :

$$\mathbf{M}_{II} = \mathbf{M}_7 \cdot \mathbf{M}_6 \cdot \mathbf{M}_5 \cdot \mathbf{M}_4 \cdot \mathbf{M}_3^* = \begin{pmatrix} -0,0518 & 1,776 \cdot 10^{-15} \\ -0,055 & -1,931 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{pmatrix}.$$

Для контроля правильности вычислений найдем определитель матрицы  $M_{II}$ :

$$\det M_{II} = AD - BC = 1.$$

С учетом равенства нулю матричного элемента  $B$  получаем:

$$\begin{pmatrix} y_2 \\ V_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,0518 & 0 \\ -0,055 & -1,931 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_1 \\ V_1 \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} 16 \cdot 10^{-3} \text{ мм} \\ -6,099 \cdot 10^{-3} \text{ рад} \end{vmatrix}.$$

Таким образом, получена высота изображения 16 мкм при угле падения 6,1 мрад.

### 3. Оптическая система из одной тонкой линзы

Запишем последовательность матриц перемещения и преломления луча, соответствующую цепочке элементов от  $OP_3^*$  до  $OP_1$ :

$$M_3^* = \begin{pmatrix} 1 & a_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, M_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix}, M_1 = \begin{pmatrix} 1 & a_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Перемещение      Преломление      Перемещение  
от  $OP_3^*$  до  $OP_2$       на  $OP_2$       от  $OP_2$  до  $OP_1$

Найдем результирующую матрицу  $M_I$ :

$$M_I = M_3^* \cdot M_2 \cdot M_1 = \begin{pmatrix} -0,349 & -9,474 \cdot 10^{-3} \\ -0,075 & -2,868 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}.$$

Для контроля правильности вычислений найдем определитель матрицы  $M_I$ :

$$\det M_I = AD - BC = 1.$$

При равенстве нулю матричного элемента  $B$  получаем:

$$\begin{pmatrix} y_2 \\ V_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,349 & 0 \\ -0,075 & -2,868 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_1 \\ V_1 \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} 9,248 \cdot 10^{-3} \text{ мм} \\ 9,387 \cdot 10^{-3} \text{ рад} \end{vmatrix}.$$

Таким образом, получена высота изображения 9,248 мкм при угле падения 9,387 мрад.

По результатам матричного расчета можно сделать следующие выводы:

• оптическая система из трех тонких линз обеспечивает минимальный размер фокусного пятна;

• наибольший диаметр наблюдается в системе из двух тонких линз;

• высота изображения, полученная матричным методом, практически полностью совпадает со значением, полученным из построения хода луча согласно законам геометрической оптики, что подтверждает справедливость построения.

### Исследование ЭОС с диафрагмой

В результате исследования ЭОС из тонких линз получена высота изображения 4,78 мкм, однако достижение электронных пучков размером 1 микрометр и менее невозможно без диафрагм, отсекающих краевые электроны. Поэтому необходимо диафрагмировать электронный пучок, для этого следует найти положение диафрагмы, обеспечивающее необходимый диаметр фокусного пятна.

В ходе расчетов поочередно устанавливалась диафрагма в передней и задней фокусных областях линз ЭОС, конструктивно допускающих ее размещение. Ниже представлен график (рисунок 8), отображающий результаты исследования. Анализ данных на графике позволяет определить положение диафрагмы первой линзы, обеспечивающее размер фокусного пятна менее 1 мкм и составляющее 28 мм.

Аналогичные расчеты показали, что расположение диафрагмы в фокусных областях второй линзы не влияет на высоту изображения, так как параллельный луч после преломления попадает в точку фокуса  $f_3$ .



**Рисунок 8 – Высота изображения при расположении диафрагмы в передней и задней фокальных областях первой линзы**

**Figure 8 – Image height when the aperture is located in front and back focal regions of the first lens**

### Заключение

В работе проведено исследование фокусирующей системы микрофокусной рентгеновской трубки, состоящей из трех магнитных линз. По результатам моделирования получены параметры магнитных линз и их положение в микрофокусной рентгеновской трубке с катодом на основе гексаборида лантана ( $\text{LaB}_6$ ), обеспечивающие диаметр фокусного пятна порядка нескольких микрометров в режиме полного токопрохождения, а также 1 мкм и менее при диафрагмировании пучка.

*Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2024-0001).*

### Библиографический список

1. Потрахов Н.Н., Грязнов А.Ю., Бессонов В.Б., Жамова К.К., Ободовский А. В. Физико-технические основы современной микрофокусной рентгенодиагностики // Известия «ЛЭТИ». 2014. № 9. С. 29-37.
2. Потрахов Н.Н., Гук К.К., Бессонов В.Б. Контроль промышленных изделий методом микрофокусной рентгенографии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023. № 3 (89). С. 31-37.
3. Рентгеновские микрофокусные трубы фирмы X-ray WorX Gmb. [Электронный ресурс] <https://www.x-ray-worx.com> (дата обращения 20.10.2025).
4. Блудов М.В., Грачев Е.Ю., Козлов Е.А., Кочергин Э.Г., Сережин А.А., Трубицын А.А. Моделирование системы электромагнитной фокусировки электронного потока в микрофокусной рентгеновской трубке // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 88. С. 115-128.

5. Сивухин Д.В. Общий курс физики: учеб. пособие для вузов. В 5 т. Т. 4. Изд. 4-е. Москва.: Физматлит, 2021. 791 с. ISBN 978-5-9221-1735-7.
6. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Пер. с англ. Бреуса С. Н. [и др.]. Изд. 2-е. Москва.: Наука, 1973. 719 с.
7. Yavor M. Advances in Imaging and Electron Physics. Academic Press, 2009, vol. 157. 388 p.
8. Трубицын А.А. Система «ФОКУС» автоматизированного проектирования устройств электронной и ионной оптики // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. №39-2. С. 121-130.
9. Джерард А., Берч Дж. М. Введение в матричную оптику. Пер. с англ. Божкова А.И. и Власова Д.В. Москва.: Мир, 1978. 342 с.

UDC 621.386.22

## STUDY OF ELECTROMAGNETIC FOCUSING SYSTEM OF MICROFOCUS X-RAY TUBE

**M. V. Bludov**, postgraduate student, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0009-0004-1811-0344, e-mail: bludovmaksim@rambler.ru

**E. Yu. Grachev**, Ph.D., Associate Professor, Department of Industrial Electronics, RSREU, Ryazan, Russia

orcid.org/0000-0001-7813-7769, email: monopol\_rus@mail.ru

**A. A. Trubitsyn**, Doctor in Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Industrial Electronics, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0002-9337-8947, e-mail: assur@bk.ru

*The study was conducted on electron-optical scheme of a microfocus X-ray tube of shot-type with electromagnetic focusing, consisting of three sequentially placed magnetic lenses. To evaluate the results, the calculations were performed using matrix method, one of the most effective methods for analyzing and synthesizing electron-optical systems. The aim of the work is to study and determine the operating modes of lenses that provide a micron diameter of the focal spot of electron flux at tube anode in the mode of full current flow at accelerating potential of 100 kV.*

**Keywords:** X-ray tube, electromagnetic focusing, matrix method, magnetic lens, electron optics.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2025-94-177-188

### References

1. Potrakhov N.N., Gryaznov A.Yu., Bessonov V.B., Zhamova K.K., Obodovskii A.V. Fiziko-tekhnicheskie osnovy' sovremennoj mikrofokusnoj rentgenodiagnostiki (Physical and technical foundations of modern microfocus X-ray diagnostics). *Izvestiya «LETI»*. 2014, no. 9, pp. 29-37. (in Russian).
2. Potrakhov N.N., Guk K.K., Bessonov V.B. Kontrol' promyschlennych isdelij metodom mikrovokucnoj rentgenogravii (Inspection of industrial products using microfocus radiography). *Sawodckaja laboratoriya. Diagnoctika materialow*. 2023, no. 3 (89), pp. 31-37. (in Russian).
3. X-ray microfocus tubes from X-ray WorX Gmb. [Electronic resource] <https://www.x-ray-worx.com> (access date 20/10/2025).
4. Bludov M.V., Grachev E.Yu., Kozlov E.A., Kochergin E.G., Serezhin A.A., Trubitsyn A.A. Modelirovaniye sistemy' e' lektromagnitnoj fokusirovki e' lektronnogo potoka v mikrofokusnoj rentgenovskoj trubke (Modeling of a system for electromagnetic focusing of electron flow in microfocus x-ray tube). *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2024, no 88, pp. 115-128. (in Russian).
5. Sivuxin D.V. *Obshhij kurs fiziki*: ucheb. posobie dlya vuzov. In 5 vol. vol. 4. 4-e izd. Moscow, Fizmatlit Publ., 2021. 791 p. ISBN 978-5-9221-1735-7. (in Russian).

6. **Born M., Vol'f E`.** *Osnovy` optiki* (Fundamentals of optics). Translated by Breus S.N. [et al.]. 2-e izd. Moscow, Nauka Publ., 1973. 719 p. (in Russian).
7. **Yavor M.** Advances in Imaging and Electron Physics. *Academic Press*, 2009, vol. 157. 388 p.
8. **Trubitsyn A.A.** Sistema «FOKUS» avtomatizirovannogo proektirovaniya ustrojstv jelektronnoj i ionnoj optiki (FOCUS system for automated design of electronic and ion optics devices). *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2012, no. 39-2. pp. 121-130. (in Russian).
9. **Dzherard A., Berch Dzh. M.** *Vvedenie v matrichnuyu optiku* (Introduction to matrix optics). Translated by Bozhkova A. I. and Vlasova D. V. Moscow, Mir Publ., 1978. 342 p. (in Russian).