

Разработка магнитной линзы микрофокусной рентгеновской трубки без принудительного жидкостного охлаждения

М. В. Блудов[✉], А. А. Трубицын

Рязанский государственный радиотехнический университет
им. В.Ф. Уткина, Рязань, Россия

[✉] bludovmaksim@rambler.ru

Аннотация

Введение. Микрофокусная рентгеновская трубка является важной составляющей современной медицинской диагностики, научных исследований и промышленных применений. Одним из ее основных элементов служит система фокусировки, частью которой является магнитная линза. Ее характеристики во многом определяют разрешающую способность устройства. На эффективность и надежность работы фокусирующей системы важное влияние оказывает правильный учет тепловых режимов. Проблема теплового расчета приобретает особую значимость ввиду интенсивного роста требований к качеству рентгеновских изображений. Для охлаждения электронных линз системы фокусировки рентгеновской трубки в основном используют принудительное жидкостное охлаждение, что создает дополнительные трудности и затраты при производстве и эксплуатации прибора.

Цель работы. Построение численной модели тепловых процессов в магнитной линзе, а также определение ее оптимальных параметров для возможности работы без принудительного жидкостного охлаждения и обеспечения микронного диаметра фокусного пятна.

Материалы и методы. Для построения модели тепловых процессов в магнитной линзе применялись численно-аналитические методы. Оценка полученных результатов выполнялась численным моделированием тепловых процессов, реализованным в среде Comsol Multiphysics.

Результаты. Значения температуры катушки магнитной линзы, полученные в рамках расчетной модели и в результате моделирования, не превышают предельно допустимых значений. Графики распределения температуры по сечению катушки в рамках расчетной модели и в модели Comsol Multiphysics имеют одинаковую форму, что подтверждает справедливость расчетов.

Заключение. Полученные оптимальные параметры магнитной линзы обеспечивают ее стабильную работу при естественном охлаждении.

Ключевые слова: рентгеновская трубка, магнитная линза, соленоид, тепловые процессы, жидкостное охлаждение

Для цитирования: Блудов М. В., Трубицын А. А. Разработка магнитной линзы микрофокусной рентгеновской трубки без принудительного жидкостного охлаждения // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 2. С. 79–90.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-79-90

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 16.09.2025; принята к публикации после рецензирования 27.10.2025; опубликована онлайн 30.04.2026



Development of a Magnetic Lens for a Microfocus X-Ray Tube without Forced Liquid Cooling

Maksim V. Bludov[✉], Andrey A. Trubitsyn

Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Russia

[✉] bludovmaksim@rambler.ru

Abstract

Introduction. The microfocus X-ray tube is a key component in modern medical diagnostic, scientific research, and industrial applications. One of its main elements is the focusing system, with the magnetic lens at its core. The characteristics of this lens largely determine the spatial resolution of the device. Accurate consideration of thermal conditions is essential for ensuring the efficiency and reliability of the focusing system. The importance of thermal analysis has increased significantly due to the tightening requirements imposed on the quality of X-ray images. Today, the electronic lenses of the X-ray tube focusing system are cooled mainly by forced liquid cooling. However, this approach creates additional technological and economic difficulties during the manufacture and operation of the device.

Aim. Construction of a numerical model of thermal processes in a magnetic lens, as well as determination of its optimal parameters for operation without forced liquid cooling and ensuring a micron diameter of the focal spot.

Materials and methods. Numerical and analytical methods were used to construct a model of thermal processes in a magnetic lens. The results obtained were evaluated using numerical modeling of thermal processes implemented in the Comsol Multiphysics environment.

Results. The temperature values of the magnetic lens coil obtained within the calculation model and as a result of simulation did not exceed the maximum permissible values. The temperature distribution graphs across the coil cross section obtained by the calculation and Comsol Multiphysics models showed good agreement, which confirms the validity of the calculations.

Conclusion. The obtained optimal parameters of the magnetic lens ensure its stable operation under natural cooling.

Keywords: X-ray tube, magnetic lens, solenoid, thermal processes, liquid cooling

For citation: Bludov M. V., Trubitsyn A. A. Development of a Magnetic Lens for a Microfocus X-Ray Tube without Forced Liquid Cooling. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 2, pp. 79–90. doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-79-90

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Source of funding. The work was performed as part of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FSSN-2024-0001).

Submitted 16.09.2025; accepted 27.10.2025; published online 30.04.2026

Введение. Микрофокусная рентгеновская трубка является важным элементом современной медицинской диагностики, научных исследований и промышленных применений. Она обладает рядом преимуществ по сравнению со стандартной макрофокусной установкой: компактностью оборудования, пониженной радиационной нагрузкой на изучаемый объект и обслуживающий персонал, возможностью локальных исследований и получения увеличенных изображений, повышенной информативностью и качеством снимков [1, 2].

Одним из основных элементов рентгеновской трубки является система фокусировки, позволяющая преобразовать широкий поток электронов с катода в тонкий электронный луч с необходимыми параметрами. Ее характеристики во многом определяют разрешающую способность устройства и достижение высококачественной работы рентгеновской трубки.

Формирование фокусного пятна в современных трубках обеспечивается последовательно размещенными электрической и магнитной фокусирующими системами. Электростатическая

катодная линза, в технических приложениях называемая катодно-модуляторным узлом, служит для ускорения электронов и создания промежуточного фокуса. При построении магнитных фокусирующих систем используют либо одну объектную линзу, либо последовательность конденсорной и объектной линз. Также перспективным является использование комбинации из постоянных магнитов и электромагнитов [3].

Эффективность и надежность работы магнитной фокусирующей системы зависит от множества факторов, среди которых важное значение имеет правильный учет тепловых режимов. Проблема теплового расчета приобретает особую значимость ввиду интенсивного роста требований к качеству рентгеновских изображений. В частности, достижение диаметра фокального пятна порядка 1 мкм требует соответствующего снижения фокусного расстояния и значительного роста магнитной силы (количества ампер-витков) магнитной линзы (МЛ), что приводит к увеличению тепловыделения и вызывает перегрев отдельных участков прибора. Для охлаждения электронных линз системы фокусировки в основном используют принудительное жидкостное охлаждение, что создает дополнительные трудности и затраты при производстве и эксплуатации прибора.

В современных работах, посвященных магнитным линзам рентгеновских трубок, практически не затрагиваются задачи тепловыделения. Они сосредоточены в основном на улучшении их оптических характеристик путем минимизации уровня аберраций или оптимизации конструктива, в частности полюсных наконечников [4–7].

В данной статье рассматривается и моделируется объективная магнитная линза микрофокусной рентгеновской трубки с прострельным анодом. Цель исследования – построение численной модели тепловых процессов в линзе, а также определение ее параметров для получения МЛ, способной работать без принудительного жидкостного охлаждения и обеспечивать микронный диаметр фокусного пятна.

Построение численной модели тепловых процессов в магнитной линзе. Магнитные линзы представляют собой аксиально-симметричный электромагнит либо постоянный магнит. В качестве МЛ чаще используют катушки с током (соленоиды) (рис. 1), чем постоянные магниты, поскольку в этом случае проще регулировать фокусное расстояние за счет изменения тока катушки и, как следствие, изменения магнитного поля.

Постановка задачи. Для оценки эффективности рассеивания тепловой мощности необходимо определить критерии, по которым можно делать выводы о работоспособности прибора при установившемся тепловом режиме. Очевидно, что главным критерием является температура в объеме твердого тела, которая не должна превышать некоторого критического значения. Такое значение может быть связано с допустимой температурой материала, а именно температурой плавления и кипения. Превышение допустимой температуры вызывает необратимые изменения в структуре твердого тела, что может привести к выходу прибора из строя.

Источником нагрева МЛ служит достаточно большой ток, питающий обмотки соленоида и

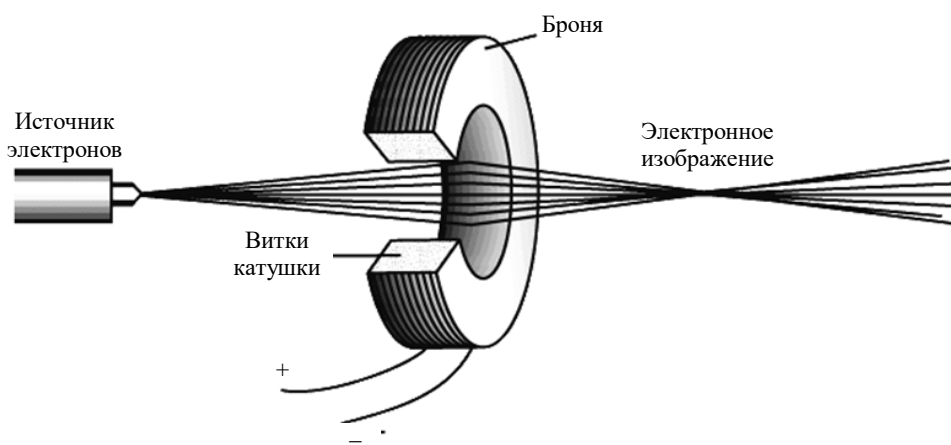


Рис. 1. Схематическое изображение магнитной линзы на основе электромагнита

Fig. 1. Schematic representation of a magnetic lens based on an electromagnet

выделяющий тепловую мощность. Поэтому для решения поставленной задачи необходимо определить максимальную тепловую мощность, которую способна выдержать МЛ без принудительного жидкостного охлаждения.

МЛ можно представить в виде катушки с током. Тепловые процессы, происходящие в ее обмотках при протекании электрического тока, имеют ряд особенностей.

Нагрев и охлаждение обмоток в значительной степени зависит от времени протекания в них электромагнитных процессов. Тепловые параметры обмотки, такие как удельная теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, температурный коэффициент сопротивления материала обмотки, зависят от температуры.

Отдача тепла в окружающую среду с поверхности обмотки также зависит от ряда факторов: геометрии, размеров и исполнения обмотки, ее температуры, условий охлаждения, теплового контакта с магнитопроводом.

Такое многообразие тепловых явлений в обмотках МЛ усложняет расчет теплового режима соленоида.

Исходные данные для построения численной модели тепловых процессов в МЛ отображены в табл. 1.

Полный расчет тепловых процессов в МЛ является довольно громоздким, поэтому далее будут приведены его наиболее важные результаты.

На первом шаге расчетов получены размеры катушки и ее обмоточные данные. Так, по известным выражениям определены размеры обмотки и допустимая температура нагрева катушки: толщина обмотки $h_0 = 0.018$ м; длина обмотки $l_0 = 0.073$ м; допустимая температура нагрева катушки $t_{\text{доп}} = 62^\circ\text{C}$.

На основании закона Ома получено сечение провода обмотки:

$$S_{\text{пр}} = \frac{\rho_{\text{наг}} l_{\text{ср}} IN}{U_{\text{min}}} = 6.788 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2,$$

где $\rho_{\text{наг}}$ – удельное сопротивление катушки в нагретом состоянии; $l_{\text{ср}}$ – средняя длина витка обмотки; I – ток обмотки в первом приближении; N – число витков в первом приближении; U_{min} – минимальное напряжение обмотки.

Табл. 1. Исходные данные

Tab 1. Initial data

Параметр	Значение
Допустимая температура нагрева катушки	$t_{\text{доп}} = 85^\circ\text{C}$
Температура окружающей среды	$t_{\text{окр}} = 23^\circ\text{C}$
Число ампер-витков в первом приближении	$I \cdot N = 2500 \text{ А} \cdot \text{В}$
Напряжение обмотки	$U = 12 \text{ В}$
Внутренний диаметр катушки, определенный в [8]	$d_0 = 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
Диаметр обмоточного провода ПЭТ-155 с изоляцией и без нее в первом приближении	$d_{\text{и}} = 1.041 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ $d = 0.95 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

Расчеты позволили уточнить диаметр провода ПЭТ-155 и выбрать его ближайшее значение из стандартного ряда [9], который с учетом округления получился равным: $d = 0.95 \cdot 10^{-3}$ м, с учетом изоляции $d_{\text{и}} = 1.041 \cdot 10^{-3}$ м.

Для обеспечения высокой плотности намотки при минимальных размерах, а также для улучшения теплоотвода за счет большей площади контакта смежных витков выбрана шахматная укладка провода.

С учетом способа укладки определен коэффициент запаса $K_{\text{зап}} = 1.376$ и получено окончательное число витков в обмотке:

$$N' = \frac{4Q_0 K_{\text{зап}}}{\pi d^2} = 2.587 \cdot 10^3 \text{ витков},$$

где $Q_0 = 1.332 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ – площадь окна намотки.

Определение ориентировочной температуры по формуле Ньютона. Далее представляется упрощенная методика теплового расчета, при которой учитывается суммарный эффект от трех видов теплоотдачи. Для установившегося теплового режима формула Ньютона будет выглядеть следующим образом:

$$dQ = K'_T S (t_{\text{доп}} - t_{\text{окр}}) dt,$$

где dQ – количество теплоты, отдаваемое за время dt ; K'_T – коэффициент теплоотдачи; S – площадь полной поверхности охлаждения тела; $t_{\text{доп}}$ – допустимая температура нагрева катушки; $t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды.

Тепловой поток в таком случае определяется как

$$\Phi_T = \frac{dQ}{dt} = K'_T S (t_{\text{доп}} - t_{\text{окр}});$$

$$\Phi_T = P = I'^2 R_{\text{наг}},$$

где P – потребляемая мощность; I' – ток обмотки; $R_{\text{наг}}$ – сопротивление нагретой обмотки. Потребляемая мощность катушки составила 9.86 Вт.

Стоит отметить, что мощность, подводимая электронным пучком к мишени прострельного типа, составляет не более 1 Вт на 1 мкм² площади поперечного сечения электронного пучка [10, 11]. Это соотношение также подтверждается техническими характеристиками микрофокусных рентгеновских трубок с прострельным анодом компаний Hamamatsu и X-RAY WorX [12, 13]. Дальнейшее увеличение плотности мощности приводит к разрушению материала анода. Причем часть тепловой мощности рассеивается из фокального пятна в воздух за счет конвекции. Также на практике между катушкой и цилиндрическим анодом обычно размещаются втулки, исключаяющие прямую передачу тепла за счет теплопроводности от анода к МЛ. Поэтому можно считать, что для рентгеновской трубки с микронным диаметром фокусного пятна на нагрев анода идет менее 1 Вт тепловой мощности, что более чем на порядок меньше мощности катушки. Таким образом, для рассматриваемой задачи нагревом пролетной трубы и ее влиянием на суммарное выделяемое количество теплоты в дальнейших расчетах можно пренебречь.

Уравнение Ньютона в этих условиях принимает вид

$$P = K'_T S (t_{\text{доп}} - t_{\text{окр}}).$$

Поскольку длина катушки в 4 раза больше высоты окна намотки, то допустимо считать катушку длинной. Тогда теплоотдачей с торцов катушки можно пренебречь. Также считаем, что катушка плотно прилегает к магнитопроводу, поэтому учитываем внутреннюю поверхность охлаждения [14].

После определения площади наружной, внутренней и полной поверхностей охлаждения получены коэффициент теплоотдачи для

предельно допустимой температуры катушки и температура нагрева обмотки [15]:

$$K'_T = \frac{3.6 \left[1 + 0.005 (t_{\text{доп}} - t_{\text{окр}}) \right]}{\sqrt[5]{S}} =$$

$$= 10.402 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}},$$

$$\tau' = \frac{P}{K'_T (S_H + \alpha_S S_B) n_P} = 49.483 \text{ °C},$$

где S_H, S_B – площади наружной и внутренней поверхностей охлаждения; $\alpha_S = 1.7$ – коэффициент, учитывающий теплоотдачу с внутренней поверхности катушки; n_P – коэффициент перегрузки по мощности.

Таким образом, температура нагрева катушки составила:

$$t_{\text{наг}} = \tau' + t_{\text{окр}} = 72.483 \text{ °C}.$$

Полученная температура нагрева не превышает максимально допустимую температуру 72.483 °C < 85 °C.

Расчет по тепловой схеме замещения. На следующей стадии анализа проводится более подробный и точный расчет с учетом различных видов теплоотдачи. Полная и эквивалентная схемы, заменяющие тепловую систему МЛ на электрическую цепь с источниками тепла, эквивалентными тепловым потерям, и тепловыми сопротивлениями, приведены на рис. 2, где обозначены: $R_{T,H}$, $R_{T,B}$ – тепловые сопротивления наружных и внутренних слоев обмотки; $R_{T,И1}$, $R_{T,И2}$ – тепловые сопротивления слоев изоляции; $R_{T,кар}$ – тепловое сопротивление каркаса; $R_{T,В.П}$ – тепловое сопротивление воздушной прослойки; $R_{T,о.н}$, $R_{T,о.м}$ – тепловое сопротивление теплоотдачи в окружающую среду от наружной поверхности катушки и магнитопровода; t_B , t_H – температура внутренней и наружной поверхности обмотки; $t_{И1}$ – температура наружных слоев внутренней изоляции обмотки; $t_{И2}$ – температура наружной поверхности обмотки наружной изоляции; $t_{кар}$ – температура на наружной стенке каркаса; t_{max} – максимальная температура нагрева; t_M – темпера-

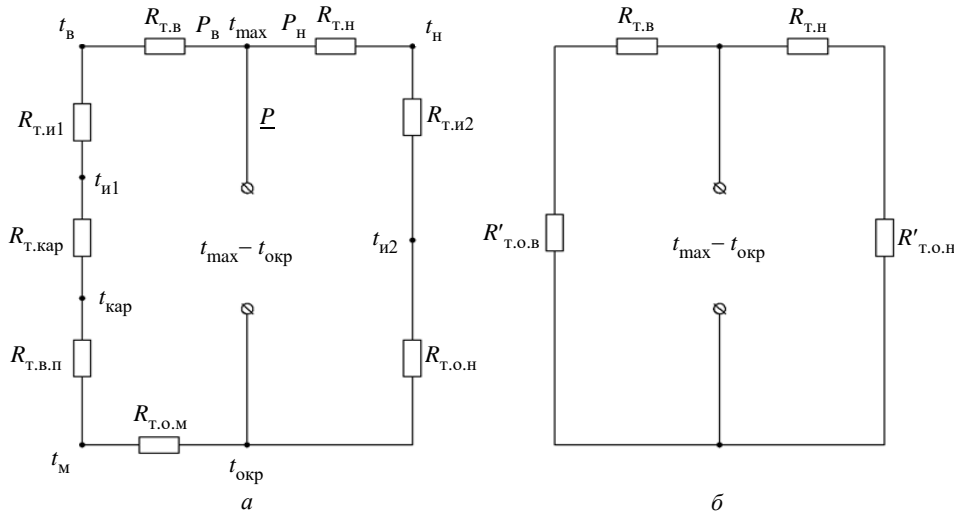


Рис. 2. Тепловая схема замещения катушки с магнитопроводом: а – полная; б – эквивалентная
 Fig. 2. Thermal scheme for replacing the coil with a magnetic circuit: а – complete; б – equivalent

тура нагрева магнитопровода; $t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды; $R'_{T.о.в}$, $R'_{T.о.н}$ – эквивалентные тепловые сопротивления в окружающую среду с внешней и наружной поверхностей обмотки.

Коэффициенты теплопередачи с наружной поверхности катушки и магнитопровода с учетом конвекции и излучения. На рис. 3 представлен эскиз катушки с магнитопроводом. На основе полученных результатов расчета задана геометрия МЛ: толщина каркаса $\Delta_{\text{кар}} = w = 5 \cdot 10^{-3}$ м; диаметр цилиндрической обмотки $d_o = 0.02$ м; длина обмотки катушки $l_o = 0.073$ м; толщина обмотки катушки $h_o = 0.018$ м; диаметр сердечника $d_c = d_o - 2\Delta_{\text{кар}} = 0.01$ м; толщина магнитопровода $a = w = 5 \cdot 10^{-3}$ м; ширина магнитопровода $b = d_c + 2(\Delta_{\text{кар}} + a + h_o) = 0.067$ м; длина магнитопровода $L = l_o + 2a = 0.083$ м.

Для определения коэффициента теплоотдачи излучением с наружной поверхности ($K_{T.и.н}$) использовались два закона теплопередачи:

1) закон Ньютона–Рихмана для конвективного теплового потока:

$$Q_K = K_{T.и.н} S_{н.п} (t_{\text{наг}} - t_{\text{окр}}),$$

где Q_K – количество теплоты, передаваемой конвекцией; $S_{н.п}$ – площадь наружной поверхности;

2) закон Стефана–Больцмана для случая,

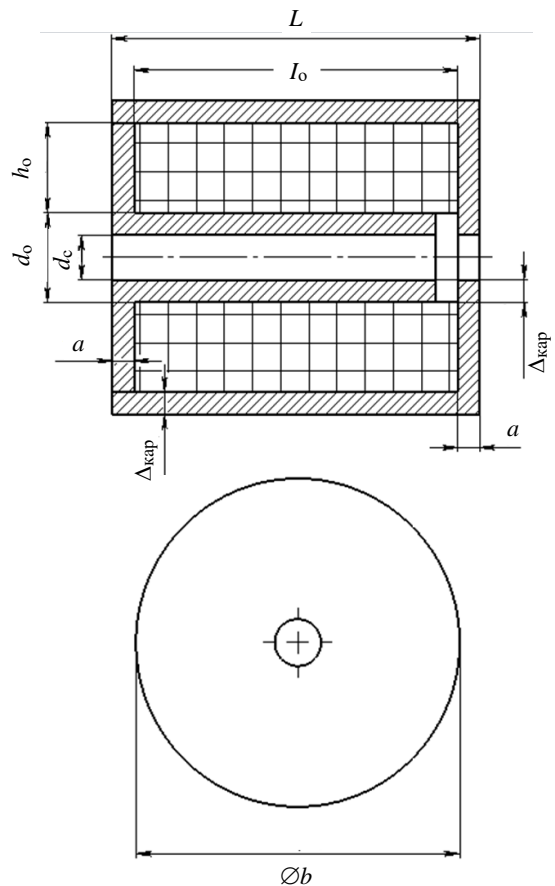


Рис. 3. Эскиз катушки с магнитопроводом
 Fig. 3. Sketch of a coil with a magnetic circuit

когда тело находится на достаточном удалении от других тел:

$$Q_{и} = 5.67 S_{н.п} \varepsilon \left[\left(\frac{273 + t_{\text{наг}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_{\text{окр}}}{100} \right)^4 \right],$$

где $Q_{\text{и}}$ – количество теплоты, передаваемой излучением; ε – степень черноты.

Поскольку теплота от катушки передается в окружающую среду конвекцией и затем излучением, то

$$Q = Q_{\text{к}} = Q_{\text{и}}.$$

Тогда коэффициент теплоотдачи излучением с наружной поверхности катушки [16]:

$$K_{\text{т.и.н}} = \frac{5.67\varepsilon_{\text{к}} \left[\left(\frac{273 + t_{\text{наг}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_{\text{окр}}}{100} \right)^4 \right]}{t_{\text{наг}} - t_{\text{окр}}} = 7.189 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}},$$

где $\varepsilon_{\text{к}} = 0.955$ – степень черноты провода катушки.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией с наружной поверхности катушки определен через критерий Нуссельта [17]:

$$K_{\text{т.к.н}} = \frac{\text{Nu}_{\text{ср}} \lambda_{\text{ср}}}{L} = 6.821 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}},$$

где $\text{Nu}_{\text{ср}}$ – критерий Нуссельта; $\lambda_{\text{ср}} = 2.83 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}$ – коэффициент теплопроводности воздуха, взятый для температуры перегрева.

В результате получен коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности катушки

$$K_{\text{т.н}} = K_{\text{т.к.н}} + K_{\text{т.и.н}} = 14.01 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}.$$

Аналогичный подход использован для получения коэффициента теплоотдачи с наружной поверхности магнитопровода:

$$K_{\text{т.м}} = K_{\text{т.к.м}} + K_{\text{т.и.м}} = 7.492 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}},$$

где $K_{\text{т.к.м}}$ – коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности магнитопровода конвекцией; $K_{\text{т.и.м}}$ – коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности магнитопровода излучением.

Эквивалентный коэффициент теплоотдачи с наружной и внутренней поверхностей обмотки. Расчет проводился согласно схеме, приведенной на рис. 4. Определены эквивалентные

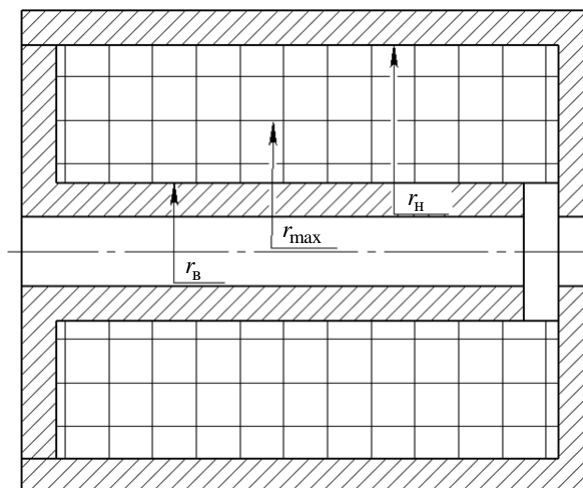


Рис. 4. Эскиз катушки с внутренними радиусами: $r_{\text{н}}$ – наружный радиус; r_{max} – радиус слоя с максимальной температурой; $r_{\text{в}}$ – внутренний радиус

Fig. 4. Sketch of a coil with inner radii: $r_{\text{н}}$ – outer radius; r_{max} – radius of the layer with maximum temperature; $r_{\text{в}}$ – inner radius

коэффициенты теплоотдачи с наружной и внутренней поверхностями обмотки [18–20]:

$$K'_{\text{т.н}} = \frac{1}{1/K_{\text{т.н}}} = 14.01 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}};$$

$$K'_{\text{т.в}} = \frac{1}{S_{\text{в}} (R_{\text{т.кар}} + R_{\text{т.о.м}})} = 35.484 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}.$$

Для нахождения радиуса наиболее нагретого слоя и максимальной температуры внутренней и наружной поверхностей катушки получен коэффициент теплопроводности замещающего тела для рядовой намотки катушки:

$$\lambda_3 = 1.45 \sqrt{\lambda_{\text{и}} \lambda_{\text{в}} \left(\frac{d}{\delta_{\text{и}}} + 1 \right)} - 1.57 \lambda_{\text{в}} = 0.466 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}},$$

где $\lambda_{\text{и}}$ – коэффициент теплопроводности изоляции обмоточного провода; $\lambda_{\text{в}}$ – коэффициент теплопроводности воздуха; $\delta_{\text{и}}$ – толщина изоляции обмоточного провода.

Радиус слоя с максимальной температурой определен следующим выражением:

$$r_{\text{max}} = \sqrt{\frac{0.5(r_{\text{н}}^2 - r_{\text{в}}^2) + \frac{\lambda_3 r_{\text{н}}}{K'_{\text{т.н}}} + \frac{\lambda_3 r_{\text{в}}}{K'_{\text{т.в}}}}{\ln \frac{r_{\text{н}}}{r_{\text{в}}} + \frac{\lambda_3}{K'_{\text{т.н}} r_{\text{н}}} + \frac{\lambda_3}{K'_{\text{т.в}} r_{\text{в}}}}} = 0.02 \text{ м},$$

где r_H – наружный радиус; r_B – внутренний радиус.

Определение максимальной температуры нагрева катушки. В соответствии со схемой замещения (см. рис. 2):

$$t_{\max} = P_H (R_{T.H} + R'_{T.O.H}) + t_{\text{окр}} = 59.766 \text{ }^\circ\text{C},$$

где P_H – мощность, рассеиваемая через наружную поверхность.

Определена температура внутренней поверхности катушки [21]:

$$t_B = t_{\max} - \frac{qP}{2\lambda_3} \left(\frac{r_B^2 - r_{\max}^2}{2} - r_{\max}^2 \ln \frac{r_B}{r_{\max}} \right) = 51.885 \text{ }^\circ\text{C},$$

где qP – удельная объемная мощность катушки.

Получена температура наружной поверхности катушки:

$$t_H = t_{\max} - \frac{qP}{2\lambda_3} \left(\frac{r_H^2 - r_{\max}^2}{2} - r_{\max}^2 \ln \frac{r_H}{r_{\max}} \right) = 55.469 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Определено выражение для распределения температуры по сечению обмотки в радиальном направлении:

$$t(r) = t_{\max} - \frac{qP}{2\lambda_3} \left(\frac{r^2 - r_{\max}^2}{2} - r_{\max}^2 \ln \frac{r}{r_{\max}} \right).$$

На рис. 5 представлен график зависимости температуры от радиуса катушки. Из рисунка видно, что максимум температуры находится на некотором удалении от внутренней полости катушки.

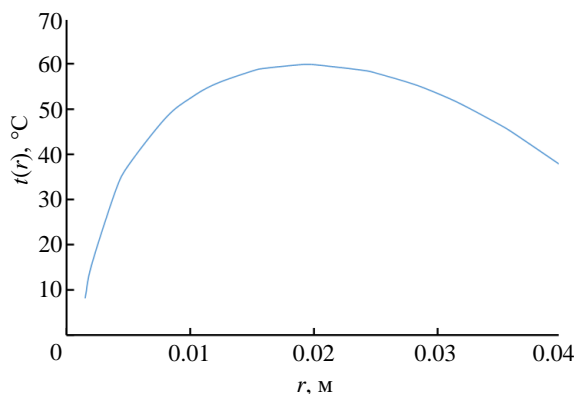


Рис. 5. Распределение температуры по сечению катушки
 Fig. 5. Temperature distribution across the coil cross section

Максимальное значение температуры $t(r)_{\max} = 59.766 \text{ }^\circ\text{C}$ наблюдается в точке $r = 0.02 \text{ м}$.

Расчет значений температур на поверхностях различных элементов катушки. Мощность, рассеиваемая через внутреннюю поверхность катушки:

$$P_B = P - P_H = 4.072 \text{ Вт}.$$

Температура наружной стенки каркаса

$$t_{\text{кар}} = P_B R_{T.O.M} + t_{\text{окр}} = 54.964 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Температуры внутренней поверхности

$$t_{H1} = t_{\text{кар}} + P_B R_{T.кар} = 79.574 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Температура наружной поверхности (данная температура была определена ранее)

$$t_H = 55.469 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Средняя температура обмотки

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_B + t_{\max} + t_H}{3} = 55.707 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Тепловой расчет магнитной линзы в среде Comsol Multiphysics. Для оценки полученных результатов проводилось моделирование тепловых процессов МЛ с учетом влияния внешнего и внутреннего каркаса в среде Comsol Multiphysics. Размеры и характеристики линзы (рис. 6) определены на основе данных, полученных при расчете в соответствии с вышеизложенной методикой.

Выполнено два тепловых исследования:

1. Исследование с использованием мультифизики (Electromagnetic Heating). Источником тепла выступал ток, питающий обмотки соленоида. В качестве исходных данных использованы магнитные свойства МЛ (Magnetic Fields) и условия теплопередачи в твердых телах (Heat Transfer in Solids) с охлаждением тела в результате естественной конвекции. Результаты моделирования отображены на рис. 7, а график распределения температуры по сечению катушки – на рис. 8.

2. Исследование с использованием теплопередачи в твердых телах (Heat Transfer in

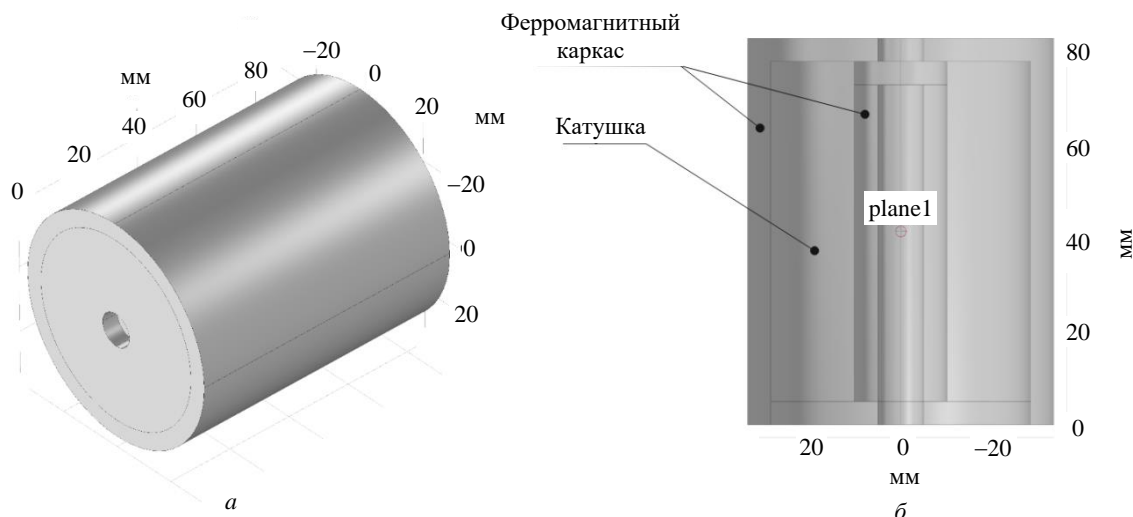


Рис. 6. Расчетная модель магнитной линзы в Comsol Multiphysics: *a* – изометрия; *б* – сечение линзы
 Fig. 6. Calculation model for a magnetic lens in Comsol Multiphysics: *a* – isometry; *б* – lens cross section

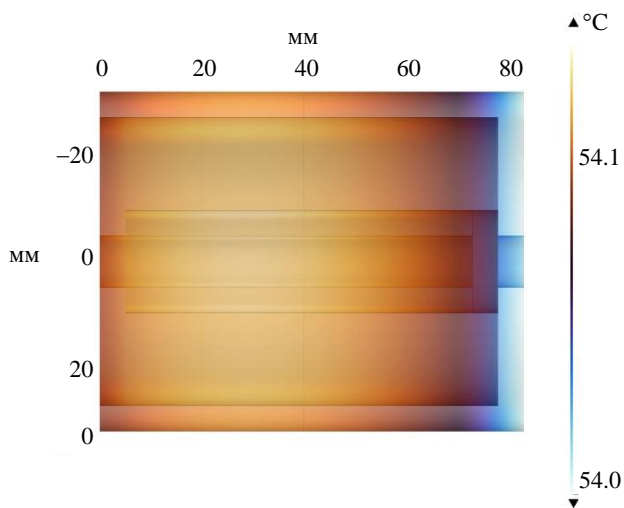


Рис. 7. Распределение температуры в МЛ при задании мультифизики

Fig. 7. Temperature distribution in a magnetic lens when specifying multiphysics

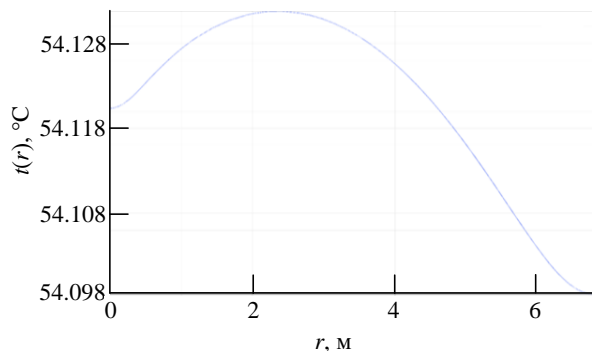


Рис. 8. Распределение температуры по сечению катушки при задании мультифизики

Fig. 8. Temperature distribution across the coil cross-section when specifying multiphysics

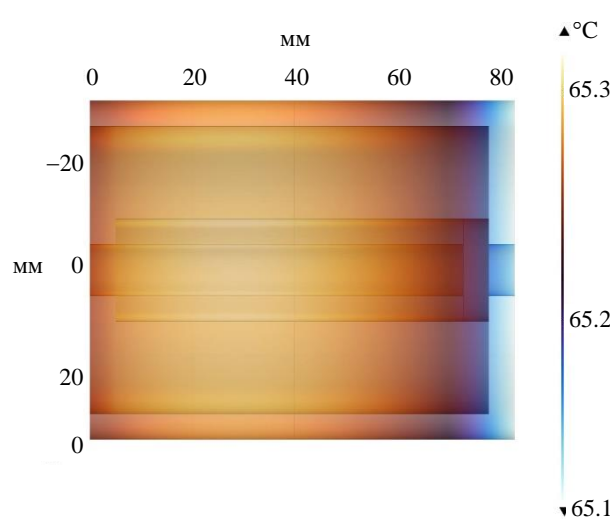


Рис. 9. Распределение температуры в МЛ при задании источника тепла

Fig. 9. Temperature distribution in a magnetic lens when specifying a heat source

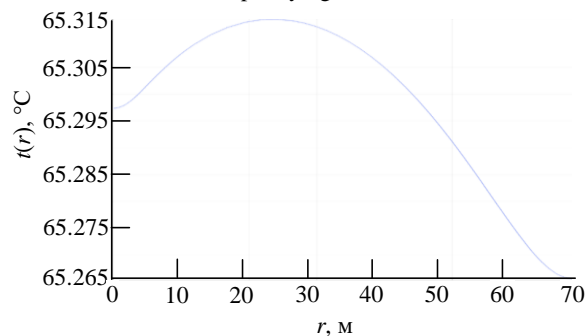


Рис. 10. Распределение температуры по сечению катушки при задании источника тепла

Fig. 10. Temperature distribution across the coil cross-section when specifying a heat source

Solids). Здесь вручную задавался источник тепла в виде значения тепловой мощности, рас-

считанной ранее. В качестве исходных данных также использовались магнитные свойства МЛ

(Magnetic Fields) и условия теплопередачи в твердых телах (Heat Transfer in Solids) с охлаждением тела в результате естественной конвекции. Результаты моделирования отображены на рис. 9, а график распределения температуры по сечению катушки – на рис. 10.

Заключение. Для оценки результатов, полученных в рамках расчетной модели, а также моделированием в Comsol Multiphysics, представлены соответствующие данные в табл. 2.

Полученные данные позволяют сделать следующие выводы:

1. Значения температуры, полученные в рамках расчетной модели и в результате моделирования в среде Comsol не превышают максимально допустимой температуры $t_{\text{доп}} = 85^\circ\text{C}$.

2. Расчетные параметры магнитной линзы обеспечивают ее работу без принудительного жидкостного охлаждения.

3. Графики распределения температуры по сечению катушки в рамках расчетной модели и в

Табл. 2. Сравнение значений температур магнитной линзы

Tab. 2. Comparison of magnetic lens temperature values

Способ определения	Температура наружной поверхности МЛ, °С	Температура внутренней поверхности МЛ, °С
По формуле Ньютона	72.483	72.483
По тепловой схеме замещения	55.469	79.574
В Comsol с заданием мультифизики	54.1	54.1
В Comsol с заданием источника тепла	65.3	65.3

модели Comsol Multiphysics имеют одинаковую форму. Стоит отметить, что подобный график распределения температуры получен в [22], что непосредственным образом указывает на справедливость полученного выражения для распределения температуры по сечению катушки.

Таким образом, в итоге проведенных исследований построена численная модель тепловых процессов в МЛ и определены оптимальные параметры такой линзы, обеспечивающие ее стабильную работу при естественном охлаждении.

Список литературы

1. Физико-технические основы современной микрофокусной рентгенодиагностики / Н. Н. Потрахов, А. Ю. Грязнов, В. Б. Бессонов, К. К. Жамова, А. В. Ободовский // Изв. СПбГЭТУ "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. Т. 89, № 3. С. 31–37. doi: 10.26896/1028-6861-2023-89-3-31-37

3. Баранов И. М., Холопова Е. Д., Атаян А. Ю. Способы фокусировки в трубках с прострельным анодом // 77-я науч.-техн. конф. Санкт-Петерб. НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио: сб. докл. 2022. № 1 (77). С. 242–244.

4. Shape Design of Magnetic Circuit of the Magnetic Lens Based on Medial Axis Transform / H. Chen, Q. Dong, X. Liu, Z. Li // Micron. 2021. Vol. 145. Art. № 103057. doi: 10.1016/j.micron.2021.103057

5. Amer A., Ahmad K. First and third-order chromatic aberrations in Glaser magnetic lens for object magnetic immersion // Heliyon. 2023. Vol. 9, № 12. Art. № e22825. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e22825

6. Musa S., Abbas T. Design and investigate the optical characteristics of single polepiece magnetics lenses. Materials Today: Proc. 2023. Vol. 80. P. 2307–2314. doi: 10.1016/j.matpr.2021.06.339

7. Practical design of the focusing system for transmission and reflection targets in X-ray sources / L. R. Zhao, Y. M. Cui, L. Y. H. Rui, W. X. Li, J. B. Liu, W. X. Zhao, P. F. Wang // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators,

Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2024. Vol. 1067. Art. № 169655. doi: 10.1016/j.nima.2024.169655

8. Моделирование системы электромагнитной фокусировки электронного потока в микрофокусной рентгеновской трубке / М. В. Блудов, Е. Ю. Грачев, Е. А. Козлов, Э. Г. Кочергин, А. А. Сережин, А. А. Трубицын // Вестн. РязГРУ. 2024. № 88. С. 115–128. doi: 10.21667/1995-4565-2023-88-115-128

9. ГОСТ 21428–75. Провода эмалированные круглые медные с температурным индексом 155. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1987. 19 с.

10. Мазуров А. И., Потрахов Н. Н. О технологиях рентгеновских систем для контроля электронных компонентов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 3. С. 113–121. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-3-113-121

11. Иванов С. А., Щукин Г. А. Рентгеновские трубки технического назначения. Л.: Энергоатомиздат, 1989. 200 с.

12. Microfocus X-ray sources. Hamamatsu. URL: <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/light-and-radiation-sources/microfocus-x-ray-source.html> (дата обращения: 21.10.2025).

13. Микрофокусные трубки компании XRAY WorX. URL: <https://www.x-ray-worx.com/products/microfocus-high-power-x-ray-tubes/> (дата обращения: 21.10.2025).

14. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. 2-е изд. М.: Энергия, 1977. 344 с.

15. Архипова Е. В., Руссова Н. В., Свинцов Г. П. Усовершенствованная методика проектного расчета

броневых электромагнитов постоянного напряжения с внедряющимися якорями // Вестн. Чувашского ун-та. 2013. № 3. С. 156–161.

16. Архипова Е. В., Руссова Н. В., Свинцов Г. П. Расчет температуры нагрева форсированной двухобмоточной броневой магнитной системы постоянного напряжения // Электротехника. 2013. № 12. С. 3–5.

17. Айзен А. М., Выскирка А. С. Метод расчета длительно допустимого тока нагрузки самонесущих изолированных проводов // Электричество. 1992. № 10. С. 5–8.

18. Любчик М. А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов. М.: Энергия, 1974. 392 с.

19. Таев И. С. Электрические аппараты: общая теория. М.: Энергия, 1977. 272 с.

20. Hashemi Ali, Qaraei P., Shabani M. Thermal Modelling of the Cylindrical Electromagnets in Transient and Steady-State Modes // COMPEL. 2023. Vol. 42, № 6. P. 1594–1608.
doi: 10.1108/COMPEL-12-2022-0410

21. Гордон А. В., Сливинская А. Т. Электромагниты постоянного тока. М.: Госэнергоиздат, 1960. 445 с.

22. Залесский А. М. Электрические аппараты высокого напряжения. Л.: Госэнергоиздат, 1957. 540 с.

Информация об авторах

Блудов Максим Витальевич – магистр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2023, Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина), аспирант кафедры промышленной электроники Рязанского государственного радиотехнического университета им. В. Ф. Уткина. Автор шести научных публикаций. Сфера научных интересов – электротехника; рентгеновские трубки; системы прецизионной магнитной фокусировки; системы электромагнитной фокусировки.

Адрес: Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина, ул. Гагарина, д. 59/1, Рязань, 390005, Россия

E-mail: bludovmaksim@rambler.ru

<https://orcid.org/0009-0004-1811-0344>

Трубицын Андрей Афанасьевич – доктор физико-математических наук (2007), профессор (2024), профессор кафедры промышленной электроники Рязанского государственного радиотехнического университета им. В. Ф. Уткина. Автор более 200 научных работ. Сфера научных интересов – численные методы моделирования электронно-оптических систем; решение задач теории потенциала; поддержка авторской программы "ФОКУС" моделирования систем электронной оптики и аналитических устройств электронной спектроскопии и масс-спектрометрии; энерго-масс-анализ вещества и управления потоками заряженных частиц.

Адрес: Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина, ул. Гагарина, д. 59/1, Рязань, 390005, Россия

E-mail: assur@bk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9337-8947>

References

1. Potrakhov N. N., Gryaznov A. Yu., Bessonov V. B., Zhamova K. K., Obodovskii A. V. Research of Characteristics of the Plasma Cathode Bounded by a Conductive Wall. Proc. of Saint Petersburg Electrotechnical University. 2014, no. 9, pp. 29–37. (In Russ.)

2. Potrakhov N. N., Guk K. K., Bessonov V. B. Control of Industrial Products by Microfocus Radiography. Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials. 2023, vol. 98, no. 3, pp. 31–37. (In Russ.)
doi: 10.26896/1028-6861-2023-89-3-31-37

3. Baranov I. M., Kholopova E. D., Atayan A. Yu. Focusing Methods in Tubes with a Shooting Anode. Proc. of the Scientific and Technical Conf. St Petersburg. 2022, no. 1 (77), pp. 242–244. (In Russ.)

4. Chen H., Dong Q., Liu X., Li Z. Shape Design of Magnetic Circuit of the Magnetic Lens Based on Medial Axis Transform. Micron. 2021, vol. 145, art. no. 103057.
doi: 10.1016/j.micron.2021.103057

5. Amer A., Ahmad K. First and Third-Order Chromatic Aberrations in Glaser Magnetic Lens for Object Magnetic Immersion. Heliyon. 2023, vol. 9, no. 12, art. no. e22825.
doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e22825

6. Musa S., Abbas T. Design and Investigate the Opti-

cal Characteristics of Single Polepiece Magnetics Lenses. Materials Today: Proc. 2023, vol. 80, pp. 2307–2314.
doi: 10.1016/j.matpr.2021.06.339

7. Zhao L. R., Cui Y. M., Rui L. Y. H., Li W. X., Liu J. B., Zhao W. X., Wang P. F. Practical Design of the Focusing System for Transmission and Reflection Targets in X-Ray Sources. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2024, vol. 1067, art. no. 169655.
doi: 10.1016/j.nima.2024.169655

8. Bludov M. V., Grachev E. Yu., Kozlov E. A., Kochergin E. G., Serezhin A. A., Trubitsyn A. A. Modeling of a System for Electromagnetic Focusing of Electron Flow in Microfocus X-Ray Tube. Bull. of Ryazan State Radio Engineering University. 2024, no. 88, pp. 115–128. (In Russ.)
doi: 10.21667/1995-4565-2023-88-115-128

9. GOST 21428–75. Enamelled Round Copper Wires with Temperature Index 155. Moscow, State Committee of the USSR for Standards form Publ., 1987, 19 p. (In Russ.)

10. Mazurov A. I., Potrakhov N. N. About Technologies of X-Ray Systems for Control of Electronic

Components. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 3, pp. 113–121. (In Russ.)
doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-3-113-121

11. Ivanov S. A., Shchukin G. A. *Rentgenovskie trubki tekhnicheskogo naznacheniya* [Technical X-Ray Tubes]. Leningrad, *Energoatomizdat*, 1989, 200 p. (In Russ.)

12. Microfocus X-Ray Sources. Hamamatsu. Available at: <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/light-and-radiation-sources/microfocus-x-ray-source.html> (accessed: 21.10.2025).

13. Product Lines of High Power X-Ray Tubes. Available at: <https://www.x-ray-worx.com/products/microfocus-high-power-x-ray-tubes/> (accessed: 21.10.2025).

14. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. *Osnovy teploperedachi* [Basics of Heat Transfer]. 2nd ed. Moscow, *Energiya*, 1977, 344 p. (In Russ.)

15. Arkhipova E. V., Russova N. V., Svintsov G. P. Improved Methodology for Design Calculation of Armored Constant Voltage Electromagnets with Embedded Anchors. Bull. Chuvash State University, 2013, no. 3, pp. 156–161. (In Russ.)

16. Arkhipova E. V., Russova N. V., Svintsov G. P. Calculation of the Heating Temperature of a Forced Two-

Winding Armored Magnetic System of Constant Voltage. Electrical Engineering, 2013, no. 12, pp. 3–5. (In Russ.)

17. Aizen A. M., Vyskirka A. S. Method for Calculating the Continuous Permissible Load Current of Self-Supporting Insulated Wires. Electricity, 1992, no. 10, pp. 5–8. (In Russ.)

18. Lyubchik M. A. *Optimal'noe proektirovanie silovykh elektromagnitnykh mekhanizmov* [Optimal Design of Electromagnetic Power Mechanisms]. Moscow, *Energiya*, 1974, 392 p. (In Russ.)

19. Taev I. S. *Elektricheskie apparaty: obshchaya teoriya* [Electrical Apparatus: General Theory]. Moscow, *Energiya*, 1977, 272 p. (In Russ.)

20. Hashemi Ali, Qaraei P., Shabanian M. Thermal Modelling of the Cylindrical Electromagnets in Transient and Steady-State Modes. COMPEL. 2023, vol. 42, no. 6, pp. 1594–1608.

doi: 10.1108/COMPEL-12-2022-0410

21. Gordon A. V., Slivinskaya A. T. *Elektromagnitny postoyannogo toka* [Direct Current Electromagnets]. Moscow, *Gosenergoizdat*, 1960, 445 p. (In Russ.)

22. Zalesskii A. M. *Elektricheskie apparaty vysokogo napryazheniya*. [High Voltage Electrical Devices]. Leningrad, *Gosenergoizdat*, 1957, 540 p. (In Russ.)

Information about the authors

Maksim V. Bludov, Master's degree in "Electronics and Nanoelectronics" (2023, Ryazan State Radio Engineering University), Postgraduate student of the Industrial Electronics Department of Ryazan State Radio Engineering University. The author of 6 scientific publications. Area of expertise: electrical engineering; X-ray tubes; precision magnetic focusing systems; electromagnetic focusing systems.

Address: Ryazan State Radio Engineering University, 59/1, Gagarin St., Ryazan 390005, Russia

E-mail: bludovmaksim@rambler.ru

<https://orcid.org/0009-0004-1811-0344>

Andrey A. Trubitsyn, Dr Sci. (Phys.-Math.) (2007), Professor (2024), Professor of the Department of Industrial Electronics of Ryazan State Radio Engineering University. The author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: numerical methods for modeling electronic-optical systems; solving the problems of potential theory; support for the author's program "Focus" modeling of electronic optics systems and analytical devices of electronic spectroscopy and mass spectrometry; energy-mass analysis of the substance and management of charged particles.

Address: Ryazan State Radio Engineering University, 59/1, Gagarin St., Ryazan 390005, Russia

E-mail: assur@bk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9337-8947>
