

На правах рукописи



Подымский Алексей Артурович

**МОЩНЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ТРУБКИ ДЛЯ ПРОЕКЦИОННОЙ  
РЕНТГЕНОГРАФИИ**

Специальность 05.27.02 –

Вакуумная и плазменная электроника, технические науки

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2016

Работа выполнена на кафедре электронных приборов и устройств Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)».

Научный руководитель: **Потрахов Николай Николаевич**,  
доктор технических наук, заведующий кафедрой  
электронных приборов и устройств  
СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Официальные оппоненты: **Брунков Павел Николаевич**,  
доктор физико-математических наук, ведущий  
научный сотрудник лаборатории «Диагностики  
материалов и структур твердотельной  
электроники» Физико-технического института  
им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук;

**Гоганов Андрей Дмитриевич**,  
кандидат технических наук, заведующий  
комплексным отделом аналитической техники  
акционерного общества «Буревестник», НПП.

Ведущая организация: Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт «Электрон», Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 27 декабря 2016 года в 15-30 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.08 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Автореферат разослан 26 октября 2016 года.

Ученый секретарь совета по защите  
докторских и кандидатских диссертаций



Е.А. Смирнов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Во второй половине прошлого века для просвечивания различных объектов в нашей стране стал широко использоваться метод проекционной рентгенографии, в первую очередь, в медицинской диагностике. Клиническая практика тех лет показала, что для успешной реализации метода размер фокусного пятна используемых рентгеновских трубок не должен превышать 0,1 мм или 100 мкм. В соответствии с принятым ГОСТ 22091.9–86 такие рентгеновские трубки относятся к классу микрофокусных, поэтому в дальнейшем метод проекционной рентгенографии получил название «микрофокусная рентгенография».

Уже в конце 80-х годов, благодаря усилиям нескольких школ рентгенологов, микрофокусная рентгенография выделилась в самостоятельное направление медицинской диагностики. При этом одну из основных ролей сыграло Ленинградское объединение электронного приборостроения (ЛОЭП) «Светлана». Ведущие специалисты отдельного конструкторского бюро рентгеновских приборов ЛОЭП «Светлана» разработали и совместно с рентгенологами нескольких крупных медицинских учреждений нашей страны успешно внедрили в клиническую практику микрофокусные рентгеновские аппараты семейства «Электроника», которые вплоть до конца прошлого века не имели зарубежных аналогов.

В разное время в развитии теории и практики метода микрофокусной рентгенографии активное участие принимали известные отечественные ученые и специалисты – Бессонов В.Б., Блинов Н.Н. (ст.), Блинов Н.Н. (мл.), Быстров Ю.А., Вайнберг Э.И., Владимиров Л.В., Иванов С.А., Иоффе Ю.К., Ключев В.В., Леонов Б.И., Мазуров А.И., Потрахов Е.Н., Потрахов Н.Н., Усачев Е.Ю., Щукин Г.А. и др.

Существенный вклад в клиническую оценку диагностических возможностей и методик применения микрофокусной рентгенографии внесли отечественные рентгенологи – Акиев Р.М., Балин В.Н., Васильев А.Ю., Васильев Ю.А., Гордеева Т.А., Дударев А.Л., Карлова Н.А., Карпенко А.К., Медведев А.П., Петкевич Г.В., Петровская В.В., Рабухина Н.А., Ушаков А.Б. и др.

Результаты их совместных исследований показали, что в случае использования микрофокусных рентгеновских трубок для просвечивания объектов медицинской диагностики при формировании рентгеновского изображения проявляется целый ряд особенностей (эффектов). Основными из них являются: эффекты увеличения глубины резкости и контраста, эффекты псевдообъемного

изображения и фазового контраста, эффект снижения экспозиционной дозы. Однако, вследствие ограничения мощности, подводимой к мишени микрофокусной рентгеновской трубки электронным пучком малого сечения, интенсивность генерируемого ею излучения по сравнению с «обычной» рентгеновской трубкой невелика. Это существенно ограничивает область применения микрофокусной рентгенографии в таких социально важных областях медицинской диагностики как ангиография, маммография, флюорография, томография и т.д.

Поэтому проведение широкого круга технических и технологических исследований с целью создания нового поколения микрофокусных рентгеновских трубок повышенной мощности и интенсивности излучения является актуальной научно-технической проблемой.

**Объект исследования** – микрофокусные рентгеновские трубки с вращающимся анодом, а также с неподвижными массивным и прострельным анодами.

**Предмет исследования** – конструкции катодных и анодных узлов рентгеновских трубок, спектры генерируемого излучения, режимы работы и технология рентгеновских трубок.

**Цель работы** – создание нового поколения микрофокусных рентгеновских трубок повышенной мощности и интенсивности генерируемого излучения.

Для достижения поставленной цели были решены следующие теоретические и практические задачи:

- анализ современного состояния и тенденции развития микрофокусных рентгеновских трубок;
- разработка инженерных методик расчета основных узлов микрофокусных рентгеновских трубок;
- разработка основ конструирования микрофокусных рентгеновских трубок повышенной мощности;
- разработка конструкций, технологии и методик испытаний новых микрофокусных рентгеновских трубок, их изготовление и практическое внедрение.

**Научная новизна работы** заключается в следующих результатах:

- теоретически и экспериментально обоснованы направления совершенствования конструкций и технологии микрофокусных рентгеновских трубок;
- разработана инженерная методика оценки тепловых и спектральных характеристик микрофокусных рентгеновских трубок;
- выполнены расчеты анодного и катодного узлов микрофокусных рентгеновских трубок повышенной мощности;

– выработаны рекомендации по выбору материала и толщины мишени и подложки анодных узлов микрофокусных рентгеновских трубок, а также режимов работы при проведении микрофокусной рентгенографии.

**Практическая значимость работы** подтверждается тем, что в результате исследований создано новое поколение отпаянных микрофокусных рентгеновских трубок, обеспечивающих повышенные в несколько раз мощность и интенсивность генерируемого излучения. Предложена и использована конструкция катодного узла, обеспечивающего плавную регулировку размеров фокусного пятна рентгеновской трубки (электронная фокусировка). Впервые в России разработаны микрофокусные рентгеновские трубки с вращающимся анодом и возможностью регулировки размера фокусного пятна в диапазоне от нескольких десятков микрометров до нескольких сотен микрометров, а также с неподвижным анодом на повышенное напряжение. Модернизирован способ измерения фокусного пятна с помощью мелкоструктурной сетки для использования цифрового приемника рентгеновского изображения.

В результате проведенных исследований на защиту выносятся следующие **научные положения:**

1. Замена в микрофокусных рентгеновских трубках с прострельным анодом материала выходного окна с бериллия на искусственный алмаз позволяет повысить интегральную интенсивность рентгеновского излучения не менее, чем на 30% во всем диапазоне рабочих напряжений на рентгеновской трубке за счет увеличения мощности, подводимой к мишени электронным пучком.

2. Замена в микрофокусных рентгеновских трубках с массивным анодом материала мишени с вольфрама на серебро позволяет, во-первых, повысить мощность, подводимую к мишени электронным пучком, в три раза, а, во-вторых, увеличить интегральную интенсивность рентгеновского излучения в диапазоне напряжений на рентгеновской трубке от 30 кВ до 70 кВ в 1,4 раза за счет вклада характеристического излучения K-линии, при этом средний контраст рентгеновского изображения будет увеличен в 1,5 раза.

3. Катодный узел с электрически изолированными от катодной головки выводами нити накала катода позволяет использовать рентгеновскую трубку с вращающимся анодом как для контактной, так и для проекционной рентгенографии с коэффициентом увеличения изображения объекта диагностики от нескольких раз до нескольких десятков раз.

**Внедрение** результатов работы выражается в том, что под руководством и при непосредственном участии автора были рассчитаны, сконструированы и освоены в серийном производстве:

– первая отечественная микрофокусная рентгеновская трубка с вращающимся анодом 0,7БД63-150, предназначенная для установки в излучателе рентгенодиагностического аппарата ИРД46;

– отпаянная микрофокусная рентгеновская трубка с массивным анодом на повышенное напряжение 0,2БПМ64-200, предназначенная для установки в моноблоке аппарата РАП-200;

– отпаянная микрофокусная рентгеновская трубка с прострельным вынесенным анодом БС16 (III конструктивное исполнение), предназначенная для установки в моноблоке аппарата РАП-150.1.

Указанные излучатели и аппараты используются в составе отечественных рентгенодиагностических и рентгенографических комплексов: семейства «ПАРДУС» (ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед», СПб), «Медикс» (ЗАО «Амико», Москва), «Калан» и «Норка» (ТСНК, Москва), а также в первом отечественном микрофокусном рентгеновском компьютерном томографе МРКТ-01 (СПбГЭТУ).

Результаты диссертационной работы **внедрены** в учебный процесс при подготовке специалистов в области рентгентехники на кафедре электронных приборов и устройств СПбГЭТУ, а также врачей-рентгенологов на кафедре рентгенологии и радиологии ВМедА (СПб) и МГМСУ.

**Апробация работы** проводилась на международных, всероссийских и региональных конференциях, съездах и научных форумах, в том числе, Всероссийская конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, 2014), Международный конгресс «Невский радиологический форум» (Санкт-Петербург, 2015), 70-я Научно-техническая конференция, посвященная Дню радио (Санкт-Петербург, 2015), I-III Всероссийские научно-практические конференции производителей рентгеновской техники (Санкт-Петербург, 2014-2016) и другие. Созданные при участии автора микрофокусные рентгеновские трубки в составе диагностических комплексов, успешно демонстрировавшихся на выставках «Здравоохранение» (Москва, 2010-2012) и «Российский промышленник» (Санкт-Петербург, 2010-2014).

По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ (из них 4 в рецензируемых научных изданиях), получено 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (81 наименование). Основная часть работы изложена на 148 страницах машинописного текста, содержит 105 рисунков и 28 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Первая глава** посвящена анализу современного состояния работ в области создания рентгеновских трубок для проекционной – микрофокусной рентгенографии.

Как известно, в основу проекционной рентгенографии (съемки с увеличением изображения объекта просвечивания) положен способ получения теневого изображения исследуемого объекта 2 с помощью расходящегося из точечного источника 1 рентгеновского излучения (рис.1). Объект при этом располагается на определенном расстоянии как от источника излучения, так и от приемника изображения 3.

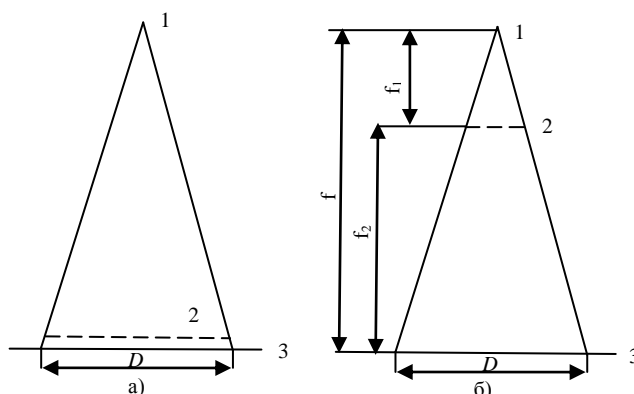


Рис. 1 Методы получения теневого рентгеновского изображения:

*a* – контактная рентгенография; *б* – проекционная рентгенография; 1 – фокусное пятно источника рентгеновского излучения; 2 – объект; 3 – приемник рентгеновского изображения;  $f_1$  – расстояние от фокусного пятна до объекта;  $f_2$  – расстояние от объекта до приемника изображения;  $f$  – расстояние фокусное пятно - приемник изображения;  $D$  – изображение объекта.

Клиническая практика показывает, что для подавляющего числа рентгенологических процедур коэффициент увеличения изображения не превышает 5 – 7 раз. В результате многолетних исследований были экспериментально обнаружены и теоретически обоснованы особенности формирования изображения в микрофокусной рентгенографии, основными из которых являются: эффекты увеличения глубины резкости и контраста, эффекты псевдообъемного изображения и фазового контраста и эффект снижения экспозиционной дозы.

Для реализации метода микрофокусной рентгенографии ОКБ РП ЛОЭП «Светлана» была создана серия трубок с полым вынесенным анодом и мишенью прострельного типа, обеспечивающих малое фокусное расстояние при съемке. Особенности трубок стали длинная пролетная труба, трехэлектродная электронная пушка, прямонакальный V-образный катод и магнитная фокусирующая система. Их основные параметры приведены в таблице 1.

Параметры микрофокусных рентгеновских трубок серии БС

Тип трубки	Толщина выходного окна Ве, мм	Размер фокусного пятна, мкм	Материал мишени анода	Номинальная мощность, Вт	Рабочее напряжение, кВ
БС-1	0,5	40-100	Cu, Re, Ag	4,5 -2,3	25 – 45
БС-6	0,5	20-100	Cu, Re, Ag	5,0-2,0	80 – 100
БС-15	0,5	20-100	W, Re	7,5	50 – 135

Наряду с преимуществами им присущ серьезный недостаток - низкая интенсивность генерируемого рентгеновского излучения, обусловленная конструкцией анода и теплофизическими свойствами материала мишени. Мощность, подводимая электронным пучком к массивной вольфрамовой мишени в длительном режиме работы, составляет не более 1 Вт на 1 мкм<sup>2</sup>. Поэтому диагностические возможности рентгеновских аппаратов, созданных на базе указанных трубок, ограничиваются стоматологией, челюстно-лицевой хирургией, маммографией, ветеринарией мелких животных.

Проведенный анализ требований к современным трубкам для проекционной рентгенографии показал, что такие трубки в общем случае должны иметь малое фокусное пятно (от нескольких микрон до нескольких десятков микрон) и обеспечивать малое фокусное расстояние (от нескольких миллиметров до нескольких десятков миллиметров), что позволит повысить разрешение снимков и большое значение коэффициента увеличения изображения. Для достижения этих целей и соответствующего расширения области применения микрофокусной рентгенографии в медицине необходимо:

- проанализировать возможные технические (конструкторские) и технологические решения по увеличению мощности микрофокусных рентгеновских трубок и повышению интенсивности генерируемого излучения;
- разработать конструкции и технологию микрофокусных рентгеновских трубок на повышенные мощность и интенсивность генерируемого излучения;
- освоить в серийном производстве семейство микрофокусных рентгеновских трубок нового поколения на повышенные мощность и интенсивность генерируемого излучения;
- уточнить критерии выбора физико-технических условий съемки и режимов работы микрофокусных рентгеновских трубок нового поколения при проведении исследований в различных областях их применения.



**Во второй** главе рассмотрены пути повышения мощности и интенсивности рентгеновского излучения микрофокусных рентгеновских трубок.

Схемы расчетных моделей тепловых режимов работы анодов представлены на рисунках 2 и 3 и указаны соответствующие граничные условия и выражения для описания температурного поля анода.

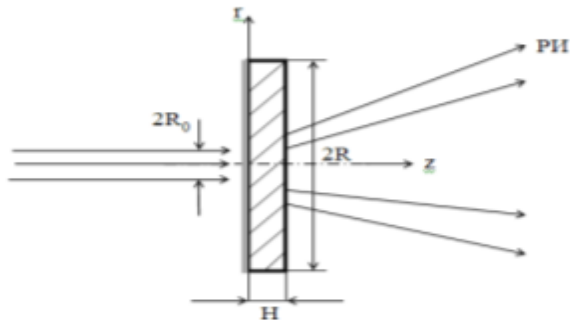


Рис 2. Расчетная модель прострельного анода с тонкопленочной мишенью

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial Z} \Big|_{Z=0} = q(r);$$

$$q(r) = \begin{cases} \frac{P}{\pi R_0^2}, & 0 \leq r \leq R_0 \\ 0, & R_0 < r < R \end{cases}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial Z} \Big|_{Z=H} = 0; \quad T|_{r=R} = T_0.$$

$$T(r, z) = T_0 + \frac{2P}{\lambda \pi R_0} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{J_1\left(\gamma_k \frac{R_0}{R}\right)}{\gamma_k^2 J_1^2 \gamma_k} \cdot J_0\left(\gamma_k \frac{r}{R}\right) \times$$

$$\times \left[ \text{cth}\left(\gamma_k \frac{H}{R}\right) \text{ch}\left(\gamma_k \frac{z}{R}\right) - \text{sh}\left(\gamma_k \frac{z}{R}\right) \right]. \quad (3)$$

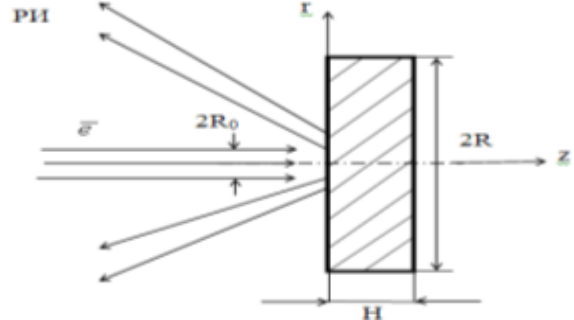


Рис 3. Расчетная модель массивного анода с массивной мишенью

$$\Delta U(r, z) = 0;$$

$$-\lambda \frac{\partial U}{\partial Z} \Big|_{Z=0} = q(r); \quad (2)$$

$$U|_{r=R} = 0; \quad U|_{z=H} = 0;$$

$$T(r, z) = T_0 + \frac{2P}{\lambda \pi R_0} \times$$

$$\times \sum_{k=1}^{\infty} \frac{J_1\left(\gamma_k \frac{R_0}{R}\right) J_0\left(\gamma_k \frac{r}{R}\right)}{\gamma_k^2 J_1^2 \gamma_k} \cdot \frac{\text{sh}\left(\gamma_k \frac{H-z}{R}\right)}{\text{ch}\left(\gamma_k \frac{H}{R}\right)}. \quad (4)$$

Таблица 2

Зависимость предельной мощности P от размеров фокусного пятна R<sub>0</sub>

R <sub>0</sub> , мкм	Прострельный анод H=0,2 мм, 2R=8мм					Массивный анод H= 0,5 мм		
	Be(4)	C(6)	Al (13)	Cu (29)	Mo(42)	W (74)	Mo(42)	Ag (47)
1	0,4	0,6	0,5	0,8	0,5	0,3	0,3	0,9
5	2,2	2,9	2,6	4,1	1,5	1,3	1,5	4,8
15	6,7	8,7	7,8	12,3	4,6	4	4,6	14,3
50	22,3	28,8	26,2	41,1	15,3	13,3	15,3	47,6
100	44,6	57,7	52,4	82,1	30,6	26,6	30,6	95,1

Данные таблицы 2 показывают, что для повышения мощности трубки с прострельным анодом в качестве материала выходного окна вместо бериллия целесообразно использовать углерод (искусственный алмаз), алюминий и медь, а с целью повышения интенсивности излучения вместо вольфрама в качестве материала массивной мишени целесообразно использовать серебро.

Изменение материала мишени анода и режимов работы трубки ведет к необходимости расчета соответствующего спектрального распределения излучения трубки.

Спектральная плотность потока квантов тормозного рентгеновского излучения трубки с прострельным анодом вычисляется с помощью выражения (5), а поток квантов характеристического рентгеновского излучения с помощью (6):

$$N_T(E) = k \cdot Z \cdot i_A \cdot \left( \frac{E_0}{E} - 1 \right) \cdot \exp((x_1 - x) \cdot \mu_M(E)) \times \exp((x_2) \cdot \mu_{BO}(E)) \cdot \exp((x_4) \cdot \mu_\Phi(E)) \cdot \exp((x_3 + x_5) \cdot \mu_{BO3D}(E)) \quad (5)$$

$$N_{X_q} = k_1 \cdot i_A \cdot \frac{\gamma \cdot \omega_q \cdot p \cdot G}{Z} \cdot \left( \frac{E_0}{E_q} - 1 \right)^{1.67} \cdot \exp((x_1 - x) \cdot \mu_M(E_q)) \times \exp((x_2) \cdot \mu_{BO}(E_q)) \cdot \exp((x_4) \cdot \mu_\Phi(E_q)) \cdot \exp((x_3 + x_5) \cdot \mu_{BO3D}(E_q)) \quad (6)$$

где  $x_1$  – толщина мишени;  $x_2$  – выпускного окна;  $x_3$  и  $x_4$  – расстояния от выходного окна до фильтра и от фильтра до объекта;  $x_5$  – толщина фильтра [см];  $\mu_M(E)$ ,  $\mu_{BO}(E)$ ,  $\mu_\Phi(E)$  и  $\mu_{BO3D}(E)$  – линейные коэффициенты ослабления [см<sup>-1</sup>].

На рисунках 4 и 5 представлены спектральные распределения потока квантов для различных материалов выходного окна. На рисунках 6 и 7 – зависимости интенсивности от напряжения и материала выходного окна.

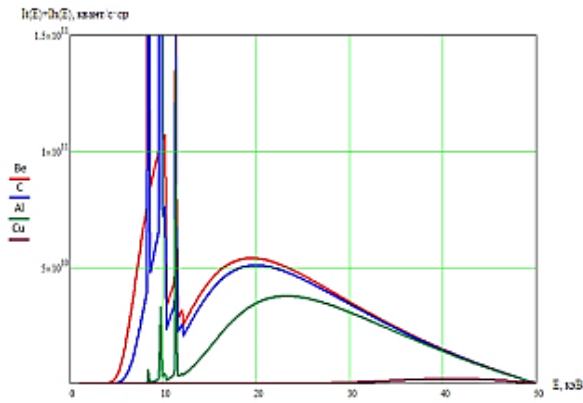


Рис. 4. Спектральная плотность потока квантов ( $H=0,5$  мм,  $U=50$  кВ)

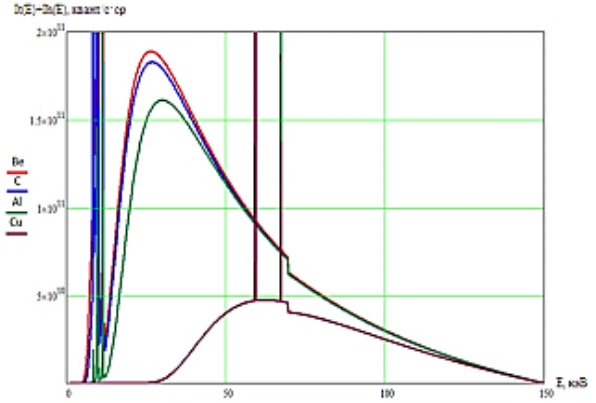


Рис. 5. Спектральная плотность потока квантов ( $H=0,5$  мм,  $U=150$  кВ)

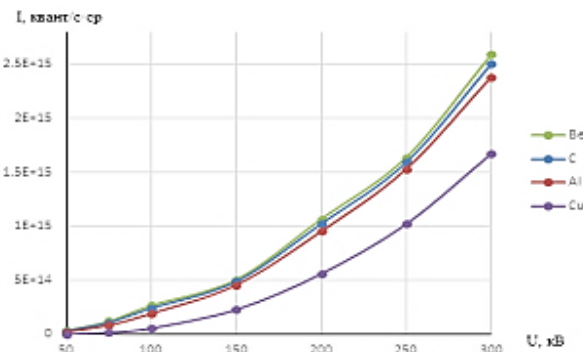


Рис. 6. Зависимость интегральной интенсивности излучения от напряжения  $U$

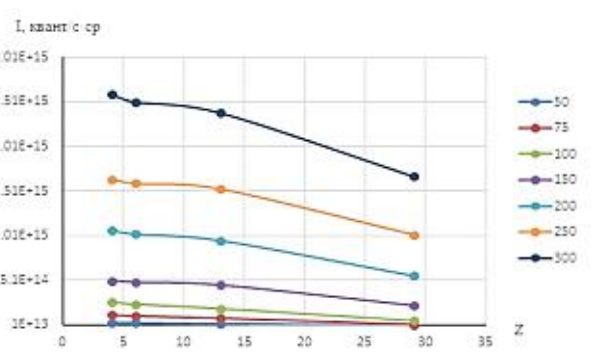


Рис. 7. Зависимость интегральной интенсивности излучения от  $Z$  материала выходного окна

Результаты расчетов (с достаточной для практического применения точностью) совпадают с данными экспериментальных исследований, которые были проведены для аналогичных условий.

Изменение спектрального состава излучения влияет на контраст получаемого изображения, определяющий возможность воспроизводить на снимке градации плотности почернения, соответствующие деталям объекта.

За счет вклада характеристического излучения K-линии Ag интегральная интенсивность излучения на трубке с серебряной мишенью при прочих равных условиях в диапазоне напряжений просвечивания до 70 кВ (фильтр 1 мм Al) выше, чем на трубке с вольфрамовой мишенью (рис. 8 и 9).

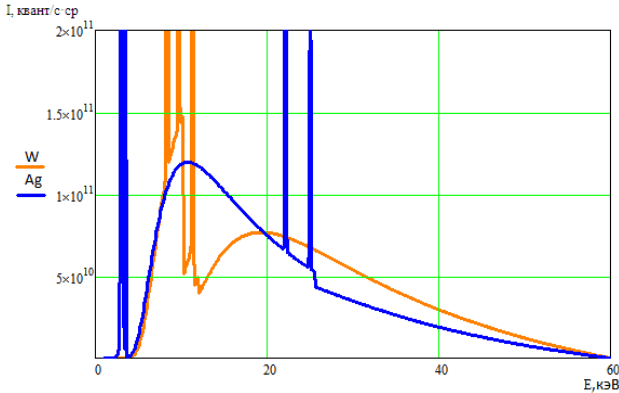


Рис. 8. Спектр излучения для трубок с мишенями из вольфрама и серебра.  $U - 60$  кВ,  $I_a - 1$  мА, толщина мишени – 7 мкм, окна – 0,5 мм

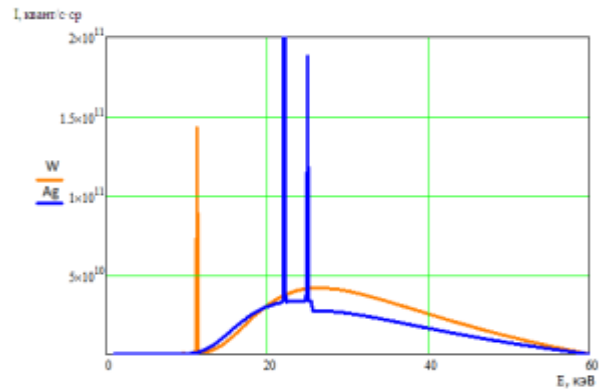


Рис. 9. Спектр излучения для трубок с мишенями из вольфрама и серебра.  $U - 60$  кВ,  $I_a - 1$  мА, толщина мишени – 7 мкм, окна – 0,5 мм. Фильтр – 1 мм Al

Соответственно контраст изображения, полученного на «серебряной» трубке, также выше, чем на «вольфрамовой» (рис. 10).

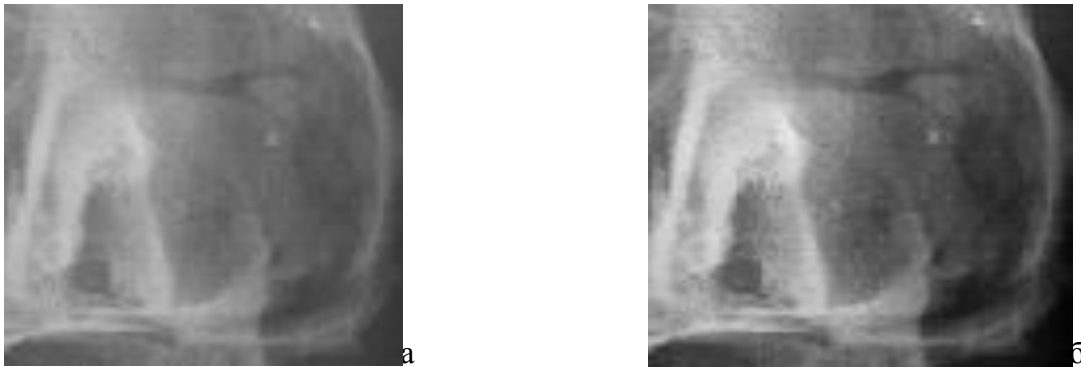


Рис. 10. Рентгенограммы участка скелетированной челюсти в водном фантоме. Мишени трубки – вольфрам (а) и серебро (б), напряжение – 50 кВ, ток – 0,1 мА, фильтр – 1 мм Al

Комплексный анализ результатов расчета анодного узла показывает, что с целью повышения мощности излучения в микрофокусных трубках целесообразно использовать:

1. При напряжении до 70 кВ в качестве материала мишени – серебро.
2. При напряжении свыше 200 кВ в качестве выходного окна прострельного анода – медь.
3. При работе в диапазоне напряжений от 30 до 300 кВ в качестве материала выходного окна прострельного анода – искусственный алмаз.

Кроме того, использование серебряной мишени позволит повысить контраст и, соответственно, обнаруживаемость мелких деталей изображения.

**В третьей главе** описаны особенности конструкции и технологии мощных микрофокусных рентгеновских трубок (МФ РТ) нового поколения, разработанных в ЗАО «Светлана-Рентген» (Санкт-Петербург).

1. Для повышения мощности МФ РТ путем увеличения тока за счет увеличения допустимой тепловой нагрузки на базе трубки 15-40БД46-150 была создана первая отечественная МФ РТ с вращающимся анодом 0,7БД63-60 (рис. 11). В результате модернизации с целью обеспечения возможности регулировки размеров фокусного пятна оба вывода катода 2 электрически изолированы от фокусирующего электрода. В состав разработанного узла входят держатель 1, катод 3 и фокусирующий электрод. На оба вывода катода напрессованы керамические изоляторы 4. На держателе закреплен фокусирующий электрод.

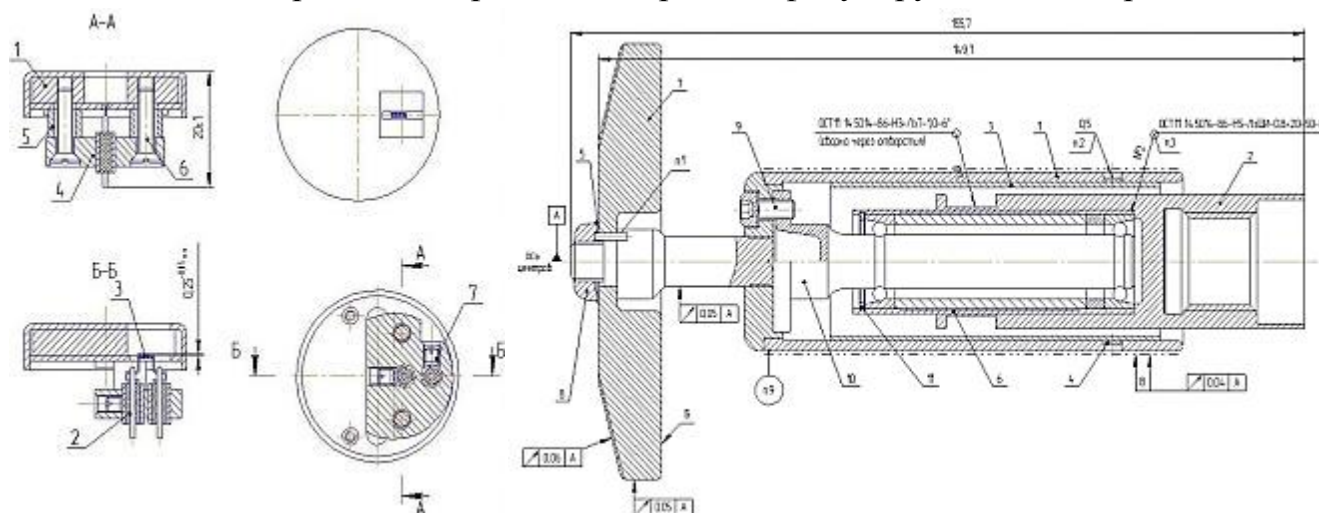


Рис. 11. Катодный и анодный узлы трубки 0,7БД63-150

Важное значение при создании трубки имела разработка узла вращения анода, поскольку уменьшение размера фокусного пятна от 0,6 мм в базовой трубке до 0,1 мм привело к ужесточению требований к величине боя в узле, а также к величине вибрации и шуму (табл. 3).

Таблица 3

Результаты расчета критических скорости  $\omega_{кр}$  и частоты вращения  $f$  анодного узла

Анодный узел	m, кг	a, см	b, см	c, см	D, см	d, см	$\omega_{кр}$	$f$ , об/мин
0,7БД63-150	0,75	5,1	5,56	1,33	8,8	1,1	1561	14910
15-40БД46-150	0,75	4,9	5,3	1,33	8,8	0,6	505	4822

С учетом численных оценок для узла вращения была выбрана бесшариковая шарико-подшипниковая опора с термокомпенсированным зазором типа ZYS99. Для обеспечения необходимой электрической прочности и устойчивой работы рентгеновской трубки допустимая величина тока утечки должна составлять не более 0,1% от рабочего значения тока. Были специально разработаны технологические схемы откачки и тренировки для этой трубки, мощность накала катода которой на порядок меньше, чем у базовой трубки.

2. Создание цифровых приемников изображения, обладающих на 2-3 порядка большим динамическим диапазоном, по сравнению с традиционными «пленочными», позволило получать достаточный для целей диагностики контраст изображений при повышенных, по сравнению с рекомендованными соответствующими ГОСТ и МУК, напряжениях. Это важно, поскольку интегральная интенсивность излучения  $I$  зависит от тока трубки  $i$  линейно, а от напряжения  $U$  квадратично. Для решения задач микрофокусной съемки при повышенном напряжении была разработана трубка 0,2БПМ64-200 с неподвижным анодом (рис. 12).

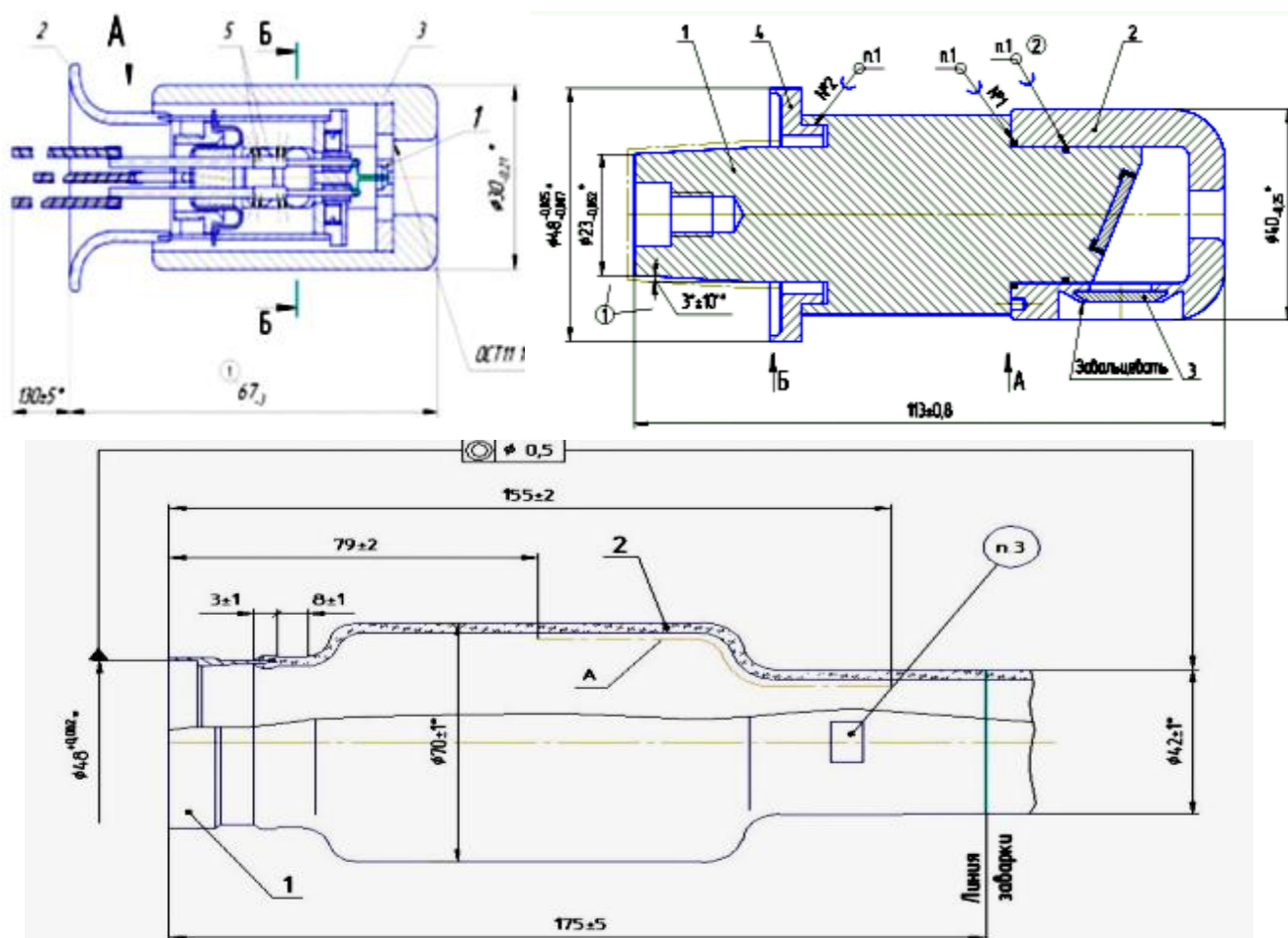


Рис. 12. Катодный узел, анодный узел и баллон трубки 0,2БПМ64-200

Благодаря специальной конструкции катодного узла в трубке осуществляется функция электростатической фокусировки пучка электронов, а отработанная методика отдельной регулировки тока накала и напряжения на фокусирующем электроде принципиально расширяет ее функциональные возможности, позволяя независимо выбирать размер фокусного пятна и ток анода. На завершающем этапе создания трубки были разработаны технологические схемы ее откачки и тренировки, реализованные в виде технологических инструкций и циклограмм.

3. Как известно для тонкопленочных вольфрамовых мишеней, нанесенных на подложку из бериллия, значение допустимой температуры не должно превышать 350-400 °С. Полученные результаты показывают, что те же мишени, нанесенные на подложку из искусственного алмаза или меди, обеспечивают большую номинальную мощность трубки. Для экспериментальной оценки тепловой нагрузочной способности образцы тонкопленочных вольфрамовых мишеней на подложке из искусственного алмаза подвергались импульсному воздействию лазерного пучка микронного сечения. Энергия излучения изменялась от 0,1 Дж до величин, при которых наблюдалась эрозия (оплавление) мишеней (рис. 13). Результаты эксперимента показали, что подложка из алмаза позволяет повысить мощность трубки в два и более раз по сравнению с бериллиевой подложкой.

Основными требованиями к создаваемой МФ РТ с прострельным анодом явились повышение мощности в непрерывном режиме работы до 20 Вт и обеспечение устойчивой работы на повышенном до 150 кВ рабочем напряжении при сохранении размеров фокусного пятна и габаритов вакуумного баллона базовой конструкции. Конструкция трубки БС16(III) показана на рисунке 14.

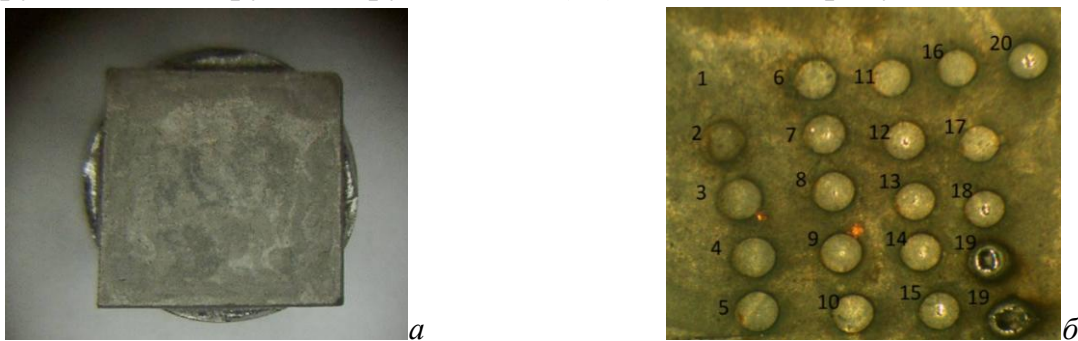


Рис. 13. Результаты теплового воздействия на тонкопленочную вольфрамовую мишень с подложкой из алмаза; а – до; б – после приложения нагрузки

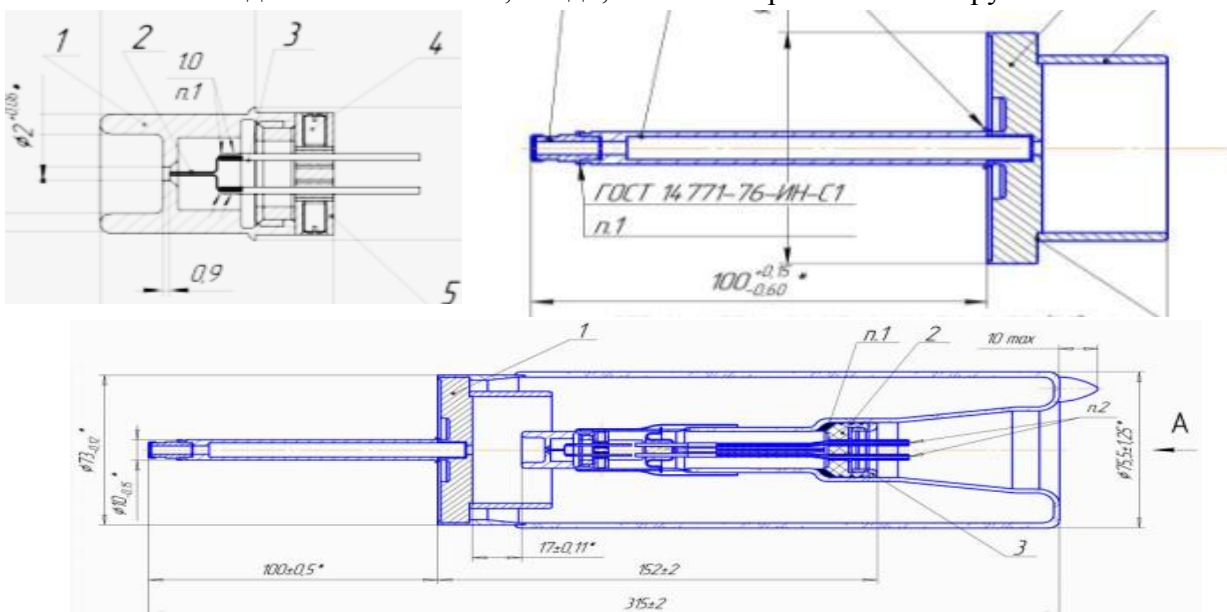


Рис. 14. Катодный узел, анодный узел и баллон трубки БС16(III)

В четвертой главе описаны методики и результаты испытаний микрофокусных рентгеновских трубок для проекционной рентгенографии. Основной целью испытаний была оценка мощности трубок при заданном размере фокусного пятна.

1. Полученные в ходе испытаний трубки 0,7БД63-150 вольт-амперные характеристики (ВАХ) позволяют оценить диагностические возможности при ее использовании в режиме «микрофокуса», а также при работе на фокусном пятне с традиционными для методики стандартной рентгенодиагностики размерами. ВАХ при нулевом напряжении на фокусирующем электроде (напряжение смещения) и при напряжении  $-50$  В, соответствующем заданным размерам фокусного пятна  $0,1$  мм, представлены на рисунках 15 и 16.

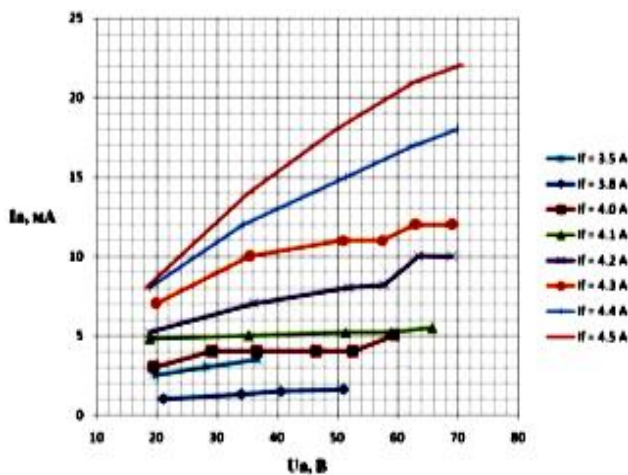


Рис. 15. Вольт-амперная характеристика без напряжения смещения

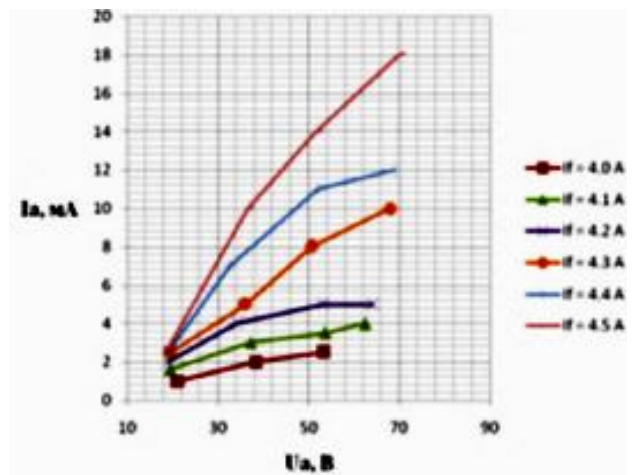


Рис. 16. Вольт-амперная характеристика с напряжением смещения  $-55$  В

2. Результаты оценки зависимости размеров фокусного пятна, определенных методом «острого» края, от тока и напряжения рентгеновской трубки 0,2БПМ64-200 представлены на рисунках 17 и 18.

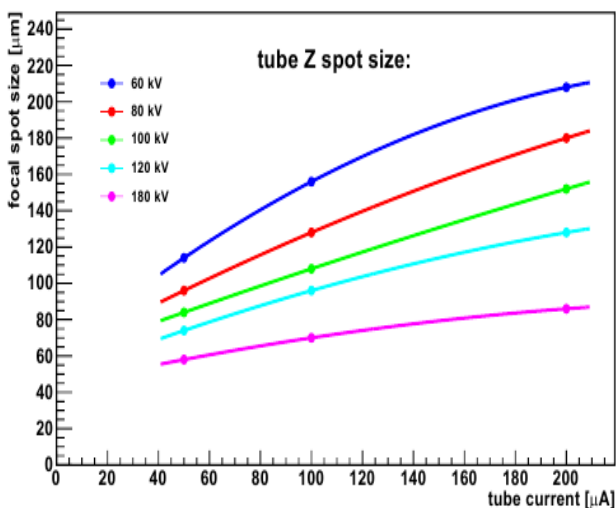


Рис. 17. Зависимость размеров фокусного пятна от тока и напряжения 0,2БПМ64-200 в направлении меньшего сечения пучка

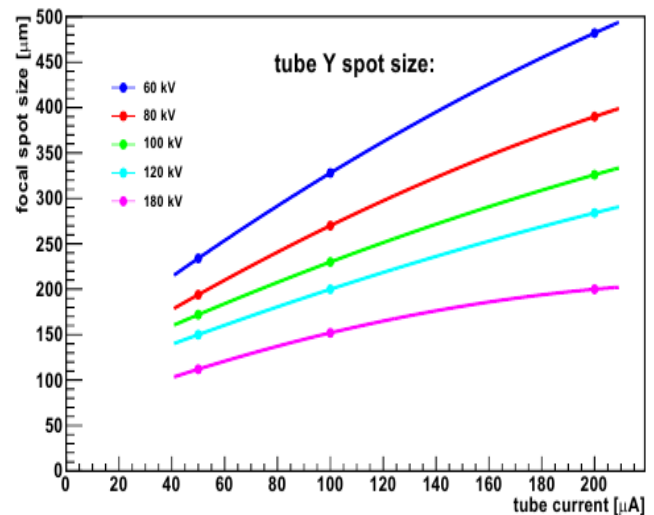


Рис. 18. Зависимость размеров фокусного пятна от тока и напряжения 0,2БПМ64-200 в направлении большего сечения пучка

3. Для оценки фокусного пятна меньших, чем в трубках 0,7БД63-150 и 0,2БПМ64-200 размеров, использован метод сеток, модернизированный для использования цифрового приемника на основе рентгеночувствительной ПЗС-матрицы с последующей компьютерной обработкой эюры плотности почернения изображения элементов тест-объекта.

Изображение измерительной сетки (рис. 19) разделялось на отдельные пары нитей. Далее производилась медианная фильтрация фрагмента изображения и строились графики зависимости яркости пикселя от его координаты для каждой строки матрицы изображения (эюра плотности почернения изображения нити) (рис. 20). По максимумам яркости пикселей определялся шаг измерительной сетки и конечный коэффициент увеличения ее изображения.

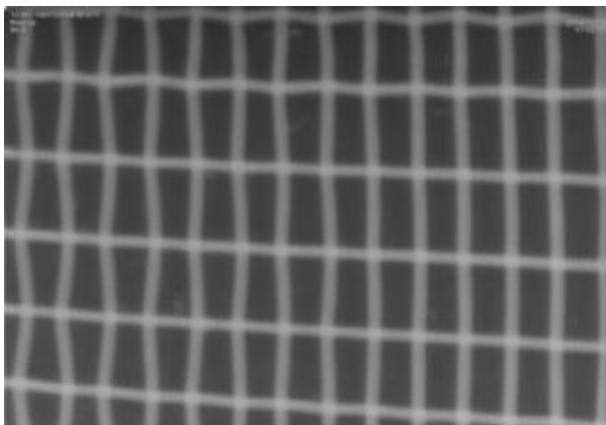


Рис. 19. Рентгеновское изображение измерительной сетки

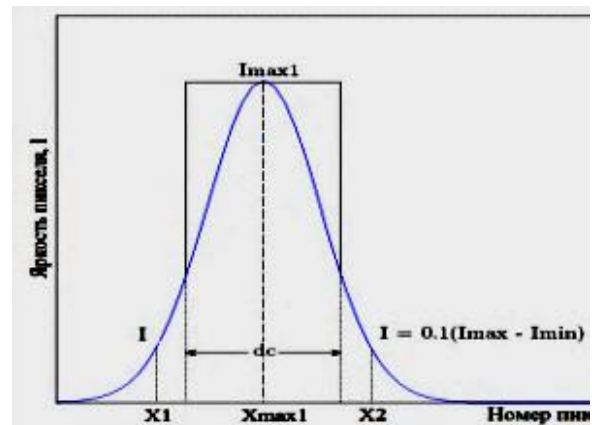


Рис. 20. Эюра плотности почернения изображения нити измерительной сетки

Размер фокусного пятна по левой и правой границам нити определялся в соответствии с выражениями

$$F_{\text{лев.эф}} = 2 \cdot d_n \left( \left( X_{\text{max1}} - \frac{d_c}{2 \cdot d_n} \right) - X_1 \right), \quad (7) \quad F_{\text{прав.эф}} = 2 \cdot d_n \left( X_2 - \left( X_{\text{max1}} + \frac{d_c}{2 \cdot d_n} \right) \right). \quad (8)$$

Конечные значения размеров фокусного пятна, определенные по двум изображениям проволок, расположенных взаимноперпендикулярно, на трех образцах трубок, представлены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты измерений фокусного пятна рентгеновской трубки БС16(III)

№ образца (	1	2	3
U, кВ	150	150	150
Ø, мкм	21×20	20×19	19×17

Измеренные значения диаметра фокусного пятна были подтверждены в ходе испытаний трубок в составе аппаратов семейства «ПАРДУС».

В целом результаты всех испытаний подтверждают соответствия ключевых характеристик разработанных рентгеновских трубок – по мощности, напряжению и размерам фокусного пятна заданным техническим требованиям.



4. Один из первых образцов рентгеновской трубки БС16(III) в составе аппарата РАП-150 был установлен в отечественном рентгеновском компьютерном томографе МРКТ-01. Принципиальное отличие томографа МРКТ-01 от зарубежных аналогов заключается в использовании отпаянной рентгеновской трубки. Использование трубки БС16(III) позволило принципиально снизить габариты и энергопотребление томографа при обеспечении разрешающей способности на уровне лучших зарубежных образцов.

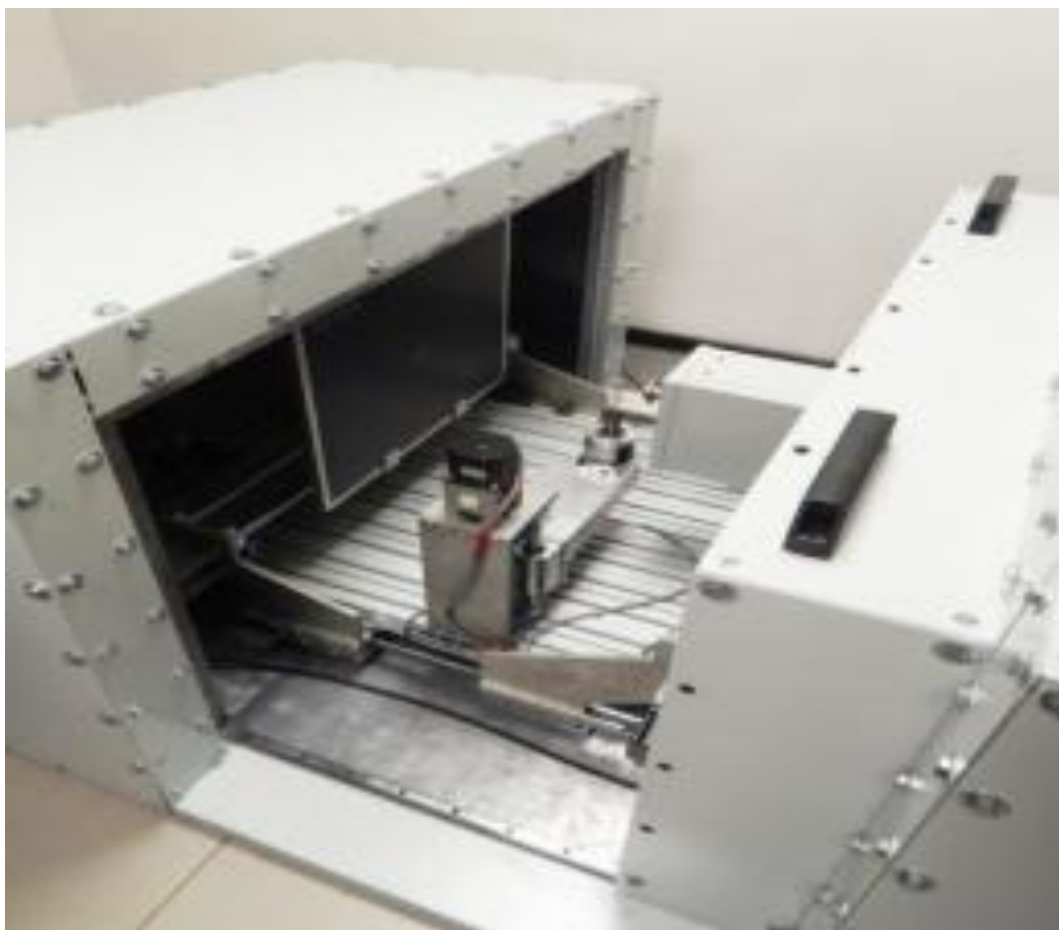


Рис. 21. Микрофокусный рентгеновский компьютерный томограф МРКТ-01

Таблица 5

Основные характеристики МРКТ-01

№	Характеристика	Значение
1	Анодное напряжение	до 150 кВ
2	Анодный ток	до 150 мкА
3	Минимальный размер фокусного пятна	5 мкм
4	Число проекций	от 100 до 4000
5	Коэффициент увеличения изображения	от 1,5 до 200
6	Предельное разрешение при реконструкции	2 мкм

Примеры получаемых рентгеновских снимков представлены на рисунке 22.

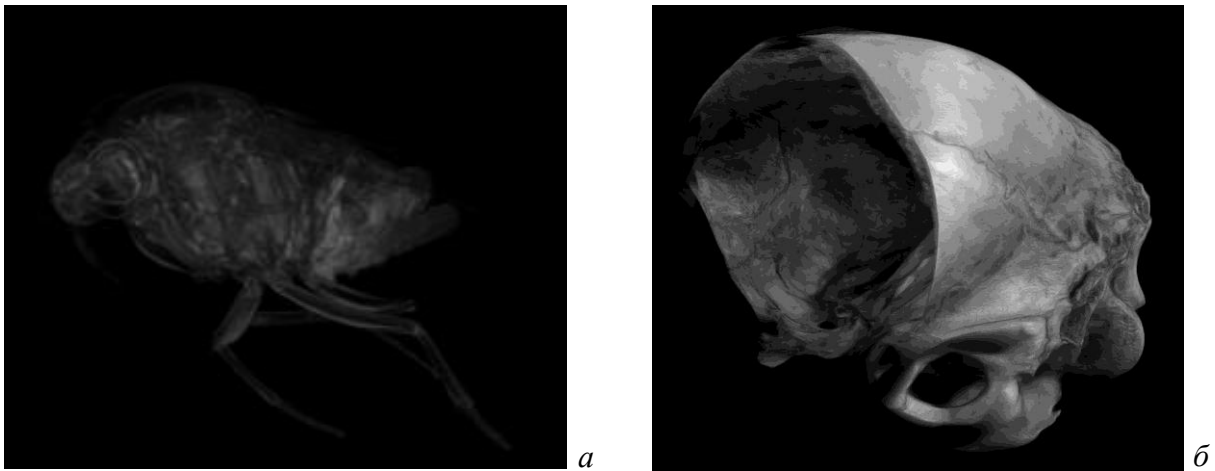


Рис. 22 Примеры рентгеновских изображений;  
*а* – мотылек; *б* – скелетированный череп кошки

Приведенные изображения показывают, что повышение максимального рабочего напряжения томографа путем установки рентгеновской трубки БС16(III) существенно повышает его просвечивающие возможности при диагностике объектов большого размера из материалов с высокой плотностью (рис. 22. *б*).

**В заключении** приведены основные результаты работы, решающей важную научно-техническую задачу – создание новой элементной базы для высоковольтной вакуумной электроники, которые заключаются в следующем:

- на основании анализа известных конструкций микрофокусных рентгеновских трубок выявлены направления их совершенствования конструкций с целью расширения областей применения источников рентгеновского излучения с фокусным пятном микронных размеров;

- на основании тепловых расчетов и расчетов спектра излучения предложены конструкции анодного, катодного и других узлов микрофокусных рентгеновских трубок с повышенной мощностью, напряжением и интенсивностью рентгеновского излучения;

- разработаны конструкции и технология производства микрофокусных рентгеновских трубок с вращающимся анодом, а также неподвижными массивным и прострельным анодами;

- предложен цифровой способ определения размеров фокусного пятна с помощью измерительной сетки;

- освоены в серийном производстве три микрофокусных рентгеновских трубки нового поколения: 0,7БП63-150, 0,2БПМ64-200 и БС16(III).

На основе разработанных трубок отечественными предприятиями ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед», ООО «Диагностика-М», ООО «Синтез НПФ», ООО «Спектрофлэш» разработаны и выпускаются рентгеновские аппараты и цифровые комплексы: РАП-150, РАП-200, «ПАРДУС», «Медикс», Т-50, «Калан» и «Норка».

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК

1. **Подымский А.А.** Микрофокусная рентгеновская трубка с вращающимся анодом [Текст] / Подымский А.А., Потрахов Н.Н. // Медицинская техника. 2014, №2. – С.19-21.
2. **Подымский А.А.** Способ оценки качества точечного сварного соединения [Текст] / Потрахов Н.Н., Бессонов В.Б., Косов В.О., Грязнов А.Ю., Жамова К.К., Подымский А.А. // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2016. №2. С. 94-97.
3. **Подымский А.А.** A micrifocus x-ray tube with rotating anode [Текст] / Podymsky A.A., Potrakhov N.N. // Biomedical engineering. 2014. №2. – С. 78-80.
4. **Подымский А.А.** Новый класс портативных рентгеновских аппаратов на катодах из нанокластеров углерода [Текст] / Фурсей Г.Н., Поляков М.А., Бегидов А.А., Подымский А.А., Якуб А.А., Закиров И.И., Фомин Д.А. // «Радиотехника и Электроника». Статья принята к печати с приоритетом от 30.12.2015.

### В других изданиях

5. **Подымский А.А.** Рентгеновские трубки нового поколения производства ЗАО «Светлана-Рентген» [Текст] / Потрахов Н.Н., Подымский А.А., Куликов Н.А. // Всероссийская конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, 2-5 июня 2014, С. 153-157.
6. **Подымский А.А.** Рентгеновские трубки нового поколения производства ЗАО «Светлана-Рентген» [Текст] / Потрахов Н.Н., Подымский А.А. // Сб. тез. научно-практического семинара, посвященного 55-летию НПП «Буревестник». Применение рентгеновских лучей в науке и технике, СПб. 2014, С.15-16.
7. **Подымский А.А.** Микрофокусная рентгеновская трубка с вращающимся анодом [Текст] / А.А. Подымский, Н.Н. Потрахов // Международный VI Невский радиологический форум, Сборник научных работ, Санкт-Петербург, 5-7 апреля, 2013, С. 224.
8. **Подымский А.А.** [Текст] / Подымский А. А., Ободовский А. В., Бессонов В. Б., Потрахов Н. Н., Иванова Р. В., Тимофеев Г. А., Потрахов Е. Н. // Микрофокусный рентгеновский аппарат повышенной мощности // II Всероссийская научно-практическая конференция производителей рентгеновской техники. 2015. С.47-50.
9. **Подымский А.А.** Новый класс портативных рентгеновских аппаратов на основе катодов из нанокластеров углерода [Текст] / Фурсей Г.Н., Поляков М. А., Бегидов А.А., Подымский А. А., Якуб А.А., Меркулов Б.П., Закиров И.И., Фомин Д.А. // II Всероссийская научно-практическая конференция производителей рентгеновской техники. 2015. С.10-15.
10. **Подымский А.А.** Портативные рентгеновские устройства на основе регистрации обратно-рассеянного излучения [Текст] / Буклей А.А., Паршин И.А., Подымский А.А. // I Всероссийская научно-практическая конференция производителей рентгеновской техники. Программа и материалы конференции. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. С. 62-63.

### Патенты, свидетельства, учебные пособия

1. Свид. об. офиц. рег. прог. для ЭВМ. 2016660604 Программа обработки рентгеновских снимков Староверов Н.Е. Грязнов А. Ю., Жамова К. К., Потрахов Н.Н., Холопова Е. Д., **Подымский А.А.** заявл. 25.07.16; зарег. 16.09.16.

ФГАОУ ВО  
«Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Подписано в печать 25.10.16. Формат 60x84x16  
Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ООО «КопиСервис»  
Печать ризографическая. Заказ № 1/1025  
П.л. 1.0. Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз.

ООО «КопиСервис», 197376, Санкт-Петербург,  
Ул. Проф. Попова, 5 литер А  
Тел.: (812) 327 5098