

На правах рукописи

Столяров Иван Николаевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКИ ДЛЯ
ЦИФРОВЫХ МАММОГРАФИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Специальность: 05.11.17 –
Приборы, системы и изделия медицинского назначения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2013

Работа выполнена на кафедре биотехнических систем Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Научный руководитель:

доктор технических наук Блинов Николай Николаевич, директор закрытого акционерного общества «АМИКО».

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Таубин Михаил Львович, главный научный сотрудник Федерального государственного унитарного предприятия «Научно-исследовательский институт Научно-производственное объединение «ЛУЧ»

доктор технических наук, доцент, Потрахов Николай Николаевич, заведующий кафедрой электронных приборов и устройств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ)

Ведущая организация:

Открытое акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Буревестник» (г. Санкт-Петербург).

Защита состоится « 6 » ноября 2013 года в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.09 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

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

Автореферат разослан « ____ » _____ 2013 года

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций

Е.В. Садыкова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Охрана здоровья женщин является одним из важнейших аспектов жизни современного общества. Среди заболеваний женского населения, связанных со злокачественными опухолями, рак молочной железы (РМЖ) занимает лидирующее положение. Ежегодно в РФ выявляется около 50 тыс. новых случаев РМЖ. Рост выявляемости и смертности от РМЖ требуют совершенствования маммологической службы страны и решения задачи раннего распознавания заболевания.

Наиболее эффективным методом ранней диагностики РМЖ является маммографическое скрининговое обследование. Выявление РМЖ на ранних стадиях позволяет увеличить продолжительность жизни больных, снизить инвалидизацию, существенно сократить затраты на лечение и реабилитацию пациенток. Поэтому проведение маммографического скрининга среди женщин имеет высокую социальную значимость.

Основными требованиями при проведении скрининговых обследований являются минимизация дозовой нагрузки на пациента и обеспечение высокого качества получаемых снимков. Это связано с чувствительностью молочной железы к воздействию ионизирующего излучения и необходимостью выявления микрокальцинатов, являющихся рентгенологическими признаками заболевания. Цифровая рентгеновская маммография в наибольшей мере удовлетворяет требованиям маммографического скрининга. Одним из распространенных методов цифровой рентгеновской маммографии является линейное сканирование на цифровой детектор.

Рентгеновские маммографические аппараты (РМА) сканирующего типа, выпускаемые на территории РФ, полностью комплектуются рентгеновскими излучателями зарубежного производства. Поэтому в дальнейшем замена рентгеновских маммографических трубок (РМТ) связана с их закупкой у зарубежных производителей. Отсутствие производства отечественных РМТ приводит к значительному уменьшению технических возможностей разработчиков при конструировании новых РМА и определяет зависимость от зарубежных поставок. В 2011 году правительством РФ была принята федеральная целевая программа, приоритетной задачей которой является импортозамещение медицинской техники.

Таким образом, актуальной научной задачей является проведение широкого круга физических и технологических исследований с целью создания отечественной

рентгеновской маммографической трубки нового поколения, предназначенной для работы в рентгеновских маммографических аппаратах сканирующего типа.

Цель работы

Целью диссертационной работы является разработка рентгеновской маммографической трубки нового поколения с улучшенными функциональными характеристиками, предназначенной для работы в цифровых рентгеновских маммографических аппаратах сканирующего типа. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие основные задачи:

1. Проведение анализа технических решений и методов, используемых при конструировании рентгеновских диагностических трубок и их основных элементов. Определение базовой конструкции РМТ.
2. Формирование и обоснование требований к функциональным характеристикам базовой конструкции РМТ с учетом специфики свойств объекта маммографических обследований и особенностей работы РМА сканирующего типа.
3. Исследование и разработка элементов базовой конструкции РМТ, обладающих улучшенными характеристиками:
 - Исследование методов улучшения рабочих характеристик катода РМТ и разработка катодного узла, отвечающего заданным требованиям.
 - Исследование вибрационных характеристик и тепловых процессов в узле вращения РМТ. Разработка методов и средств обеспечения работоспособности узла вращения на частоте 9000 об/мин и улучшение теплового режима работы подшипников.
 - Исследование методов изготовления вращающихся анодов рентгеновских диагностических трубок и разработка конструкции композиционного анода с улучшенными характеристиками.
 - Исследование методов увеличения мощности дозы в рентгеновских трубках и разработка методов повышения эффективности мишени РМТ.
 - Исследование методов повышения надежности оболочек рентгеновских трубок в условиях увеличенной тепловой нагрузки.
 - Исследование методов создания и поддержания высокого вакуума в рабочем объеме оболочки РМТ и усовершенствование технологии её вакуумирования.
4. Разработка РМТ нового поколения для цифровых РМА сканирующего типа с улучшенными функциональными характеристиками, полученными в результате исследований.

Методы исследований

Для решения поставленных задач выполнен анализ и обобщение литературных данных в области создания рентгеновских диагностических трубок медицинского назначения. Теоретические исследования выполнены с применением методов математического анализа и моделирования, численных расчетов и обработки экспериментальных данных. Экспериментальные исследования выполнены на специально разработанных макетах и стендовом оборудовании.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная РМТ нового поколения предназначена для работы в цифровых РМА сканирующего типа с выявлением микрокальцинатов на ранних стадиях образования и позволяет снизить дозовую нагрузку на пациента на 50 %.
2. Показано, что обработка короткоимпульсным лазерным излучением в жидких средах рабочей поверхности плоского эмиттера снижает его рабочую температуру на 200 °С благодаря уменьшению работы выхода электрона с поверхности вольфрама.
3. Показано, что формирование микрорельефа на поверхности анода с размерами микронеровностей 100-200 нм методом обработки короткоимпульсным лазерным излучением в этаноле обеспечивает увеличение мощности дозы рентгеновского излучения на 18 %.
4. Применение плоских вольфрамовых поликристаллических эмиттеров, изготовленных методом лазерной вырезки из листа, позволяет уменьшить геометрические искажения фокусного пятна на 50 % и повысить ток эмиссии по сравнению со спиральными эмиттерами.
5. Применение композиционного анода с титановым основанием позволяет уменьшить тепловой поток от анода к шейке вала подшипников при эксплуатации трубки на 20 %.
6. Полученные экспериментальные и расчетные данные доказывают возможность применения анода с титановым основанием в рентгеновских маммографических трубках для всего диапазона их эксплуатации.

Научная новизна

1. На основании проведенных исследований по улучшению функциональных характеристик рентгеновских трубок разработана РМТ нового поколения. Применение разработанной РМТ позволило увеличить ресурс, снизить дозовую нагрузку на пациента, повысить эффективность исследований, благодаря улучшению качества получаемых снимков.
2. В результате исследования методов модификации поверхности электродов рентгеновской трубки, разработана технология повышения их эффективности, основанная на формировании микрорельефа на рабочих поверхностях плоского

эмиттера и мишени анода методом обработки короткоимпульсным лазерным излучением в жидких средах.

3. Исследована зависимость мощности дозы рентгеновского излучения от параметров микрорельефа на рабочей поверхности анодного диска рентгеновской трубки. Установлено, что наличие упорядоченных микроструктур с размером 100 – 200 нм обеспечивает увеличение мощности дозы на 18 %.
4. Разработана технология изготовления плоского эмиттера методом лазерной вырезки, обеспечивающая отсутствие микродефектов на поверхности эмиттера.
5. Установлено, что использование плоского эмиттера, изготовленного методом лазерной вырезки из поликристаллического вольфрама, позволяет повысить ток эмиссии и уменьшить геометрические искажения фокусного пятна.
6. Показано, что применение композиционного анода с титановым основанием позволяет уменьшить температуру на шейке вала подшипников при эксплуатации трубки на 150 °С.
7. Показана возможность использования геттерных свойств композиционного анода на основании титана в процессе производства и эксплуатации рентгеновской трубки.

Практическая значимость работы

1. На основании расчетных данных и экспериментальных исследований разработана конструкция катода, обеспечивающая точность позиционирования эмиттера в 0,01 мм. Повышена точность фокусировки катодом электронного пучка и обеспечена повторяемость размеров фокусного пятна.
2. Исследована и внедрена в производство технология изготовления композиционного медно-титанового ротора методом диффузионной сварки, что увеличило надежность узла вращения РМТ в условиях повышенной тепловой нагрузки.
3. Выработаны меры по уменьшению теплового потока от анода к узлу вращения и разработаны конструкции тепловых барьеров, обеспечившие снижение рабочей температуры подшипников на 30 %.
4. Разработана металлостеклянная оболочка РМТ с бериллиевым выходным окном. Увеличена прочность и надежность вакуумной оболочки РМТ.
5. Разработана технология вакуумирования металлостеклянной РМТ с композиционным анодом на основе титана. Обеспечено уменьшение давления остаточных газов в рабочем объеме РМТ на один порядок и повышена надежность её работы.
6. Разработана и внедрена в производство конструкция штенгельного узла для герметизации оболочки РМТ без нагрева, позволившая сократить продолжительность откачки и улучшить качество герметизации.

7. Разработана методика динамической балансировки роторов рентгеновских трубок с применением метода спектрального виброанализа и приведением ротора во вращение бесконтактным способом.
8. Разработана и внедрена в производство РМТ с улучшенными функциональными характеристиками для РМА сканирующего типа.

Апробация работы

Материалы диссертационной работы докладывались на VI Всероссийском национальном конгрессе лучевых диагностов и терапевтов «Радиология-2012», Москва; «Невский радиологический форум – 2013», Санкт-Петербург.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, из них 5 статей в рецензируемых научно-технических журналах, включенных в перечень ВАК, тезисы доклада на VI Всероссийском национальном конгрессе лучевых диагностов и терапевтов «Радиология-2012» и на «Невском радиологическом форуме-2013», 1 решение о выдаче патента РФ на полезную модель по заявке № 2013132406. Личное участие автора в указанных работах выразилось в определении цели, разработке методов исследования, проведении экспериментов, анализе и обобщении результатов, формулировании выводов.

Реализация и внедрение результатов

Разработанные рентгеновская маммографическая трубка запущена в опытное производство на предприятии ЗАО «РЕНТГЕНПРОМ». Годовой объем аппаратов, комплектуемых данной трубкой, составляет 50 единиц в год.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, включающего 172 наименований, пяти приложений. Основная часть работы изложена на 146 страницах машинописного текста. Работа содержит 66 рисунков и 14 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и основные научно-технические задачи, решаемые в диссертации, определены её научная новизна и практическая ценность, изложены научные положения, выносимые автором на защиту.

Первая глава посвящена определению базовой конструкции РМТ для РМА сканирующего типа, разработке и обоснованию требований к её функциональным характеристикам с учетом специфики объекта исследования и особенностей работы РМА.

Анализ технических решений и методов, используемых при конструировании рентгеновских трубок, позволил определить состав базовой конструкции современной РМТ.

Характерной особенностью работы РМА сканирующего типа, в отличие от аппаратов, использующих технику коротких снимков, является большая длительность экспозиции, которая определяет время взаимодействия электронного пучка с материалом мишени. Поэтому при сканирующем снимке значительно возрастают требования к теплоемкости анода, которая должна составлять порядка 225 кДж. Также, во избежание перегрева, необходимо решать задачу обеспечения эффективного теплоотвода с мишени.

Для того чтобы снизить мгновенную температуру в области фокусного пятна, представляющего собой площадку размером $0,3 \times 0,3 \text{ мм}^2$ на поверхности анода, до значений, обеспечивающих нормальную эксплуатацию трубки, частота вращения анода должна быть увеличена до 9000 об/мин. Это, в свою очередь, серьезным образом ужесточает требования к качеству изготовления деталей узла вращения с анодом и точности динамической балансировки.

Требование к способности воспринимать значительные тепловые нагрузки является общим для всех элементов базовой конструкции РМТ. В частности, подшипники узла вращения РМТ в значительной степени подвержены воздействию повышенных тепловых нагрузок. Условия работы подшипников требуют принятия мер по ограничению теплового потока от анода. Кроме того, шум, возникающий при работе трубки не должен превышать 55 дБ, согласно требованиям санитарных норм СН № 3057-84.

Свойства объекта маммографических обследований определяет некоторые специфические особенности работы РМТ. С целью выявления микрокальцинатов размерами до 100 мкм от РМА требуется обеспечить пространственное разрешение не менее 10 пар линий на мм, что достигается уменьшением размера фокусного пятна РМТ до 0,3 мм. Различие в свойствах исследуемых объектов, в частности плотности тканей, у пациентов различной возрастной группы, определяет широкий диапазон значений анодного тока РМТ, который должен составлять не менее 100 мА.

Низкая естественная контрастность объекта обследования определяет работу РМТ в длинноволновой части спектра рентгеновского излучения, что требует относительно невысоких значений анодного напряжения, обычно не превышающих 40 кВ. По этой же причине необходимыми условиями является минимальная величина собственной фильтрации РМТ материалом выходного окна и малая загрязненность спектра.

При низкой энергии гамма-квантов, характерной для молибденового анода, увеличивается поглощенная доза рентгеновского излучения. Чувствительность тканей молочной железы к воздействию ионизирующего излучения увеличивает риск первичного канцерогенеза. Однако, высокий динамический диапазон цифровых детекторов позволяет использовать в конструкции РМТ и вольфрамовые аноды. В сочетании с различными материалами фильтров более жесткий спектр рентгеновского излучения способствует уменьшению доли рассеянного излучения в мягких тканях.

Таким образом, на основании проведенного анализа особенностей работы РМА сканирующего типа и специфики объекта обследований, определены основные требования к функциональным характеристикам базовой конструкции РМТ представленные в таблице 1.

Таблица 1. Основные требования к функциональным характеристикам базовой конструкции РМТ

Номинальный размер фокусного пятна, мм.....	0,3
Максимальное анодное напряжение, кВ.....	15 – 40
Максимальный анодный ток, мА.....	150
Длительность экспозиции на 28 кВ 150 мА, сек.....	до 7
Теплоемкость анода, кДж.....	Не менее 225
Частота вращения анода, об/мин.....	3000/9000
Уровень шума, дБ.....	Не более 55
Ресурс, тыс. вкл.	Не менее 25

Вторая глава посвящена исследованию и разработке конструкции катодного узла для РМТ и методам улучшения его рабочих характеристик.

Катодный узел определяет такие функциональные характеристики РМТ как анодный ток и размер фокусного пятна. Фокусное пятно является электронной проекцией эмиттера на поверхность анода. Все ограничения по пространственному разрешению и входной мощности анода рентгеновской трубки напрямую связаны с размерами фокусного пятна. Повторяемость и стабильность этого параметра гарантируют постоянство рабочих характеристик рентгеновского аппарата и качество получаемых снимков.

Для удовлетворения функциональным характеристикам РМТ, катодный узел должен обеспечивать получение фокусного пятна размером 0,3 мм и величину анодного тока до 150 мА. С целью исследования параметров фокусирующей системы катодного узла на геометрию фокусного пятна был разработан металлостеклянный макет, воспроизводящий условия работы РМТ.

Экспериментальные исследования, проведенные с использованием макета, позволили выбрать конструкцию катодного узла и определить расстояние между электродами соответствующее положению плоскости наилучшей фокусировки, совпадающей с поверхностью анода. Это обеспечило получение минимального размера фокусного пятна.

Для выбранной конструкции катода было исследовано влияние величины расстояния между электродами на максимальную величину анодного тока. Установлено, что при изменении межэлектродного расстояния от 15 до 7 мм, величина анодного тока возрастает в 3 раза. Экспериментально были определены значения геометрических факторов, необходимых для получения фокусных пятен размерами 0,3 и 0,1 мм (рис. 1).

На равномерность распределения интенсивности рентгеновского излучения по полю снимка оказывает большое влияние распределение электронов по площади фокусного пятна на аноде. Распределение электронов в фокусном пятне зависит от равномерности нагрева рабочей поверхности эмиттера, стабильности его формы во время термоциклирования при эксплуатации и состояния физической поверхности эмиттера.

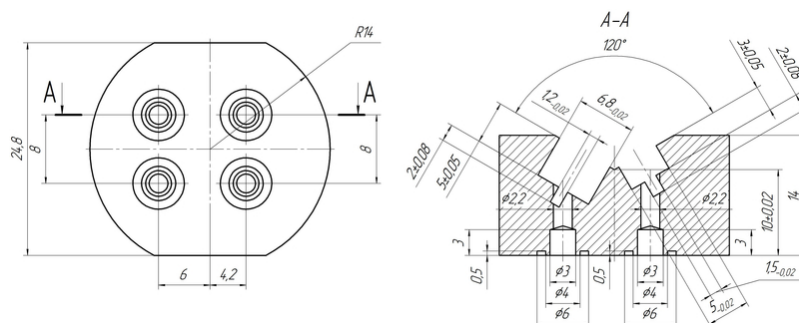


Рисунок 1 – Конструкция катода РМТ, обеспечивающая номинальные размеры фокусного пятна 0,3 и 0,1 мм.

В традиционно используемых спиральных эмиттерах, навиваемых из вольфрамовой проволоки, для формирования анодного тока используются лишь электроны, эмитированные частью винтовой поверхности, обращенной к аноду. Криволинейность эмитирующей поверхности изначально обуславливает значительный разброс по энергиям электронов и их траекториям. Анализ запатентованных технических решений и данных, приведенных в литературных источниках, показал, что применение плоских вольфрамовых эмиттеров позволяет исключить указанные недостатки и обеспечить меньшие размеры фокусного пятна, по сравнению со спиральными эмиттерами.

Оценочный расчет минимально достижимого размера ширины фокусного пятна 2δ , получаемого от плоского эмиттера, проводился согласно следующему уравнению:

$$\delta = f \cdot \sqrt{E_k/V_a} \quad (1)$$

где E_k – начальная кинетическая энергия электронов, V_a – энергия ускорения, f – фокусное расстояние катодной линзы. При средней температуре накала эмиттера 2320 °С, рабочих напряжениях 25-35 кВ и фокусном расстоянии 7 мм расчетная ширина фокусного пятна лежит в диапазоне от 0,05 мм до 0,06 мм.

Технология изготовления плоского поликристаллического эмиттера основана на электроэрозионной обработке вольфрамовой пластины в жидкости (рис. 2(а)). Этот метод достаточно хорошо освоен и обладает высокой точностью и производительностью. Однако удаление металла указанным способом сопряжено с воздействием электрической искры на обрабатываемую кромку металла. Вероятность образования острых выступов, являющихся источниками автоэмиссионных токов в рентгеновской трубке и связанных с этим явлением микрозарядов достаточно высока. Сглаживание микронеровностей поверхности вольфрама методами электрохимического травления ограничено малыми размерами детали.

Для решения обозначенной проблемы, был исследован и внедрен в производство метод прецизионной вырезки с использованием импульсного лазера на парах меди (рис. 2(б)). Данная технология изготовления плоского эмиттера позволила уменьшить размеры дефектов поверхности и их количество.

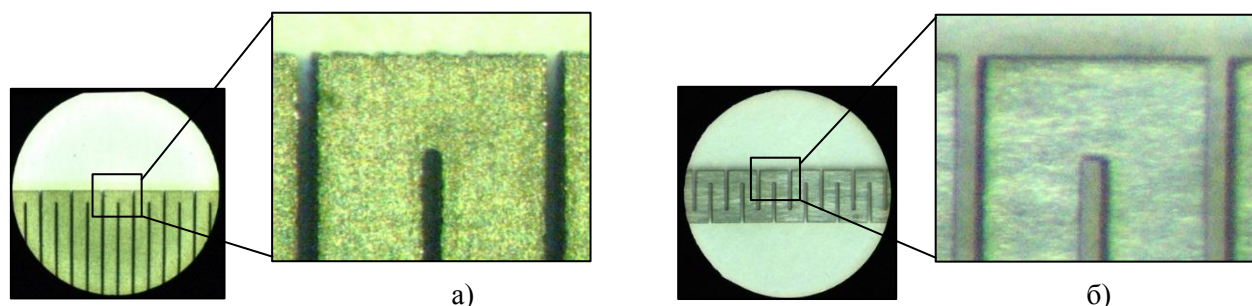


Рисунок 2 – Место вырезки пазов плоских вольфрамовых эмиттеров, увеличение $\times 10$ крат. а – электроэрозионная вырезка, б – вырезка импульсным лазером на парах меди с длиной волны 0,51 мкм и энергией импульса 0,2 мДж.

В условиях относительно невысокого рабочего напряжения, характерного для маммографических обследований, только часть эмитированных с эмиттера электронов достигает поверхности анода, в то время как другая образует пространственный заряд вокруг катода. Таким образом, получение анодного тока 150 мА в РМТ связано с определенными трудностями. Величина тока термоэмиссии описывается следующей зависимостью:

$$I_{\text{нас}} = A_0(1 - \bar{R})ST^2 e^{-\frac{\varphi}{kT}} \quad (2)$$

где A_0 – термоэмиссионная постоянная Зоммерфельда; S – площадь рабочей поверхности эмиттера; T – температура катода по абсолютной шкале Кельвина (К), – коэффициент отражения электронов на границе тело-вакуум; ϕ – работа выхода электронов из эмиттера; k – постоянная Больцмана $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Согласно уравнению (2) и условию работы эмиттера в режиме пространственного заряда увеличение анодного тока возможно за счет снижения работы выхода эмиттера и увеличения площади его рабочей поверхности. Основываясь на данном утверждении, было исследовано влияние методов обработки рабочей поверхности плоского поликристаллического вольфрамового эмиттера на его эмиссионные характеристики. В рамках исследования был изучен способ обработки образца, помещенного в жидкую среду, короткоимпульсным лазерным излучением с длинами волн 800 нм и 1064 нм.

В ходе работы было выполнено экспериментальное исследование влияния параметров лазерного излучения на характеристики микрорельефа образца. Установлено, что время задержки между импульсами лазерного излучения является фактором, определяющим плотность и размеры наноструктур на обрабатываемой поверхности (рис. 3). Анализ полученных зависимостей показывает, что максимальная плотность наноструктур на поверхности образца соответствует времени задержки между импульсами лазера в 1 пс.

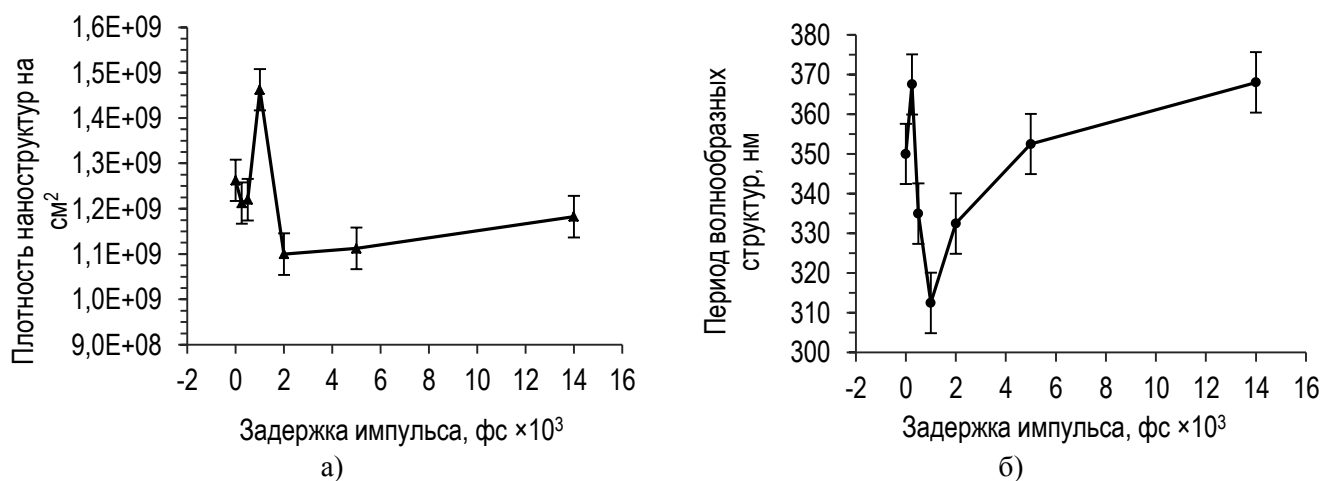


Рисунок 3 – Зависимость плотности наноструктур (а) и периода волновых структур (б) от времени задержки между импульсами.

В результате экспериментальных исследований были установлены параметры лазерного излучения и разработана технология обработки рабочей поверхности плоского эмиттера, обеспечившие максимальный прирост площади физической поверхности и однородность микрорельефа. Экспериментальное исследование эмиссионных характеристик обработанных эмиттеров показало снижение работы выхода электрона на $0,3 \pm 0,05$ эВ. Установлено, что сформированные структуры стабильны при длительном отжиге в вакууме.

Третья глава посвящена исследованию вибрационных характеристик и тепловых процессов в узле вращения РМТ и разработке методов и средств обеспечения работоспособности узла вращения на частоте 9000 об/мин и улучшению теплового режима работы подшипников.

Для обеспечения функциональных характеристик РМТ были решены следующие основные задачи: разработана конструкция узла вращения, стабильно работающая на частоте 9000 об/мин с уровнем шума не превышающем 55 дБ; внедрена методика диагностики состояния узла вращения; разработан стенд динамической балансировки узлов вращения рентгеновских трубок и методика динамической балансировки.

Расчет элементов конструкции узла вращения проводился с целью выбора конструктивных решений, обеспечивающих минимальную механическую нагрузку на подшипники и наименьший уровень вибраций. Из долговременной практики эксплуатации рентгеновских трубок известно, что уровень шума по истечению времени может возрасти, а скорость вращения снижаться, что объясняется износом подшипников. Для исключения интенсивного изнашивания рабочих элементов радиально-упорных подшипников был выполнен расчет гироскопических моментов вращения шариков с целью выбора усилия осевого натяга по общей формуле

$$M_{\Gamma} = \frac{\pi}{60} \cdot \rho \cdot d_{\text{ш}}^4 \cdot \omega_0^2 \cdot D' \cdot \sin\beta \cdot 10^{-15} \quad (3)$$

где ρ – плотность материала шарика; $d_{\text{ш}}$ – диаметр шарика, мм; ω_0 – угловая скорость центра шарика, вращающегося вокруг оси подшипника, рад·с⁻¹; D' – диаметр окружности контакта на наружной обойме подшипника, мм; β – угол наклона оси вращения шариков по отношению к оси вращения подшипника, град.

В качестве метода оценки рабочего состояния узла вращения рентгеновской трубки была выбрана вибродиагностика. Экспериментально подтверждена её надежность и приемлемость для решения поставленных задач. Исследованы основные источники, вызывающие вибрации ротора, к которым были отнесены силы механического и электрического происхождения.

Основным источником механических вибраций являются дисбаланс и тепловая деформация узла вращения. Для контроля и устранения источников вибраций был разработан стенд динамической балансировки узлов вращения рентгеновских трубок, позволяющий производить спектральный анализ вибросигналов в трех плоскостях измерения на заданных скоростях вращения анода (рис. 4).

Определение скоростей динамической балансировки осуществлялось с учетом данных математического моделирования критических частот вращения различных

конструктивных исполнений роторов с использованием прикладных программ Autodesk AutoCAD Inventor. Результаты расчетов и данные экспериментального исследования вибрационных характеристик роторов послужили основой для разработки методики проведения динамической балансировки.

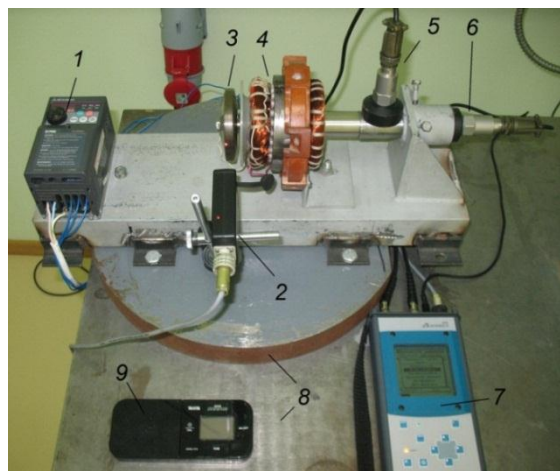


Рисунок 4 – Стенд динамической балансировки. 1 – преобразователь частоты, 2 – лазерный отметчик, 3 – узел вращения, 4 – статор, 5, 6 – пьезоакселерометры для регистрации поперечных и осевых составляющих вибрации соответственно, 7 – виброанализатор, 8 – массивное основание, 9 – весы.

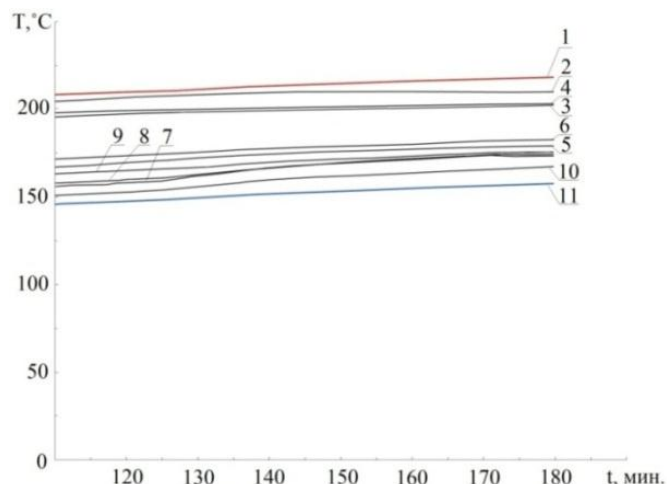


Рисунок 5 – Зависимость температуры подшипника узла вращения от времени для различных конструкций тепловых барьеров (кривые 1 – 11). Установившийся режим. Тепловой поток 500 Вт.

Суть методики заключается в поэтапной балансировке ротора и анода на выбранных скоростях вращения с учетом расчетных данных. Методика позволила вдвое сократить количество балансировочных пусков и в полтора раза повысить точность проведения балансировки, что в итоге положительно сказалось на шумовых и вибрационных характеристиках узла вращения.

Требованиями ГОСТ 1940-1-2007 для валов данной массой, рабочей частоты вращения 9000 об/мин и класса точности G 0,16 определяется допустимая величина остаточного дисбаланса в 0,25 г·мм. Разработанная методика позволяет получить значения остаточного дисбаланса до 0,10 г·мм. Особенность способа балансировки заключается в том, что приведение во вращение ротора осуществляется за счет сил электромагнитного поля. Это исключает контакт поверхностей узла вращения с традиционно используемыми приводными пассивными балансировочных станков.

С целью уменьшения температуры подшипников, было исследовано влияние тепловых барьеров на изменение тепловых потоков в узле вращения РМТ (рис. 5). Экспериментальные исследования различных конструкций тепловых барьеров и оценка их эффективности были проведены с использованием специального теплового макета для моделирования теплового режима работы рентгеновской трубки. Результатом проведенных исследований стала выработка мер по

ограничению теплового потока от анода к элементам узла вращения и снижение рабочей температуры подшипников на 30 %.

Результаты исследования вибрационных и шумовых характеристик разработанного узла вращения также показали, что предлагаемая конструкция исключает работу узла вращения в резонансных областях частотного диапазона.

Четвертая глава посвящена исследованию и разработке композиционного анода с улучшенными параметрами для РМТ нового поколения.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований конструкций анодов рентгеновских трубок и методов их изготовления определили выбор композиционной конструкции анода с основанием, выполненным из титана. Проведенные расчеты и экспериментальные исследования показали, что теплофизические и механические свойства титана удовлетворяют требованиям к условиям эксплуатации анода. С учетом данных, полученных в результате исследований, была разработана технология изготовления анодного диска с применением диффузионной сварки через промежуточные слои.

Использование титана в конструкции анода обеспечило ряд преимуществ по сравнению с традиционно используемыми анодами. Высокая пластичность титана позволила упростить операцию проведения динамической балансировки. Невысокая плотность титана позволила снизить массу готового анода на 40%, относительно традиционно используемых молибденового или вольфрам-молибденового анодов сопоставимой теплоемкости.

Важнейшим требованием к качеству рентгеновской трубки является её способность сохранять вакуум на протяжении всего срока эксплуатации. К причинам потери вакуума в приборе можно отнести натекание через стенки прибора, некачественный пережим, газовыделение из деталей в процессе эксплуатации прибора. Для поддержания рабочего давления в рентгеновской трубке часто используются твердые и распыляемые газопоглотители.

Задача активации геттеров решается либо индукционным нагревом, либо пропусканием тока через геттер. Первое решение требует изменения конструкции рентгеновской трубки для размещения таблетки с геттерирующим материалом, второе – введения дополнительных герметичных тоководов.

Применение компактного титана в качестве основания композиционного анода с температурой активации 300 – 500 °С позволяет использовать его как геттер в отпаянном объеме рентгеновской трубки. Экспериментальное исследование влияния температуры нагрева титанового основания анода, на остаточное давление в откаченном объеме доказывает высокую эффективность его работы (рис. 6).

Для использования титана в качестве основания композиционного анода с целью поддержания рабочего давления в отпаянной рентгеновской трубке, была разработана методика герметизации РМТ и предварительной обработки анода. Применение данной методики позволило существенно улучшить остаточное давление в откачанном объеме.

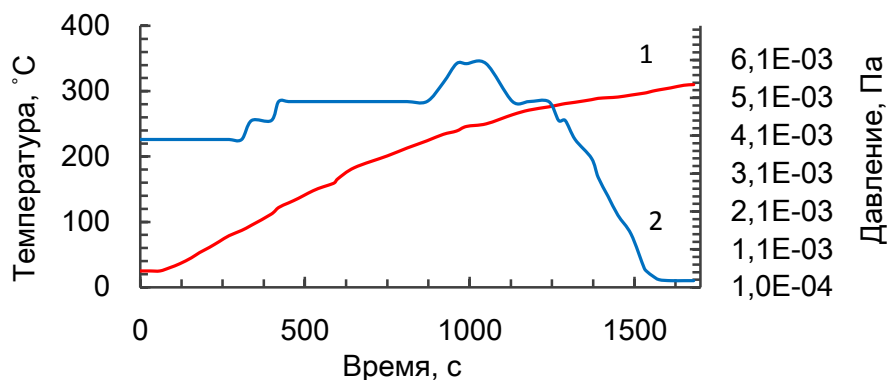


Рисунок 6 – Зависимость остаточного давления в РМТ от температуры анода и времени нагрева. 1 – температура анода, 2 – давление.

Одним из возможных способов повышения радиационного выхода рентгеновской трубки может быть увеличение числа столкновений электронов с поверхностью мишени анодного диска в области фокусного пятна. Так как геометрические размеры фокусного пятна строго заданы, обеспечение этого требования возможно благодаря увеличению физической площади рабочей поверхности мишени.

С целью исследования влияния параметров микрорельефа рабочей поверхности анода на мощность дозы рентгеновского излучения был проведен ряд экспериментов. Результаты экспериментов позволили выбрать в качестве метода модификации рабочей поверхности анода обработку короткоимпульсным лазерным излучением в жидкой среде. Это обеспечило получение гомогенного массива микроструктур размерами 100 – 200 нм. Прирост мощности дозы рентгеновского излучения обработанного анода составил 18 %, относительно анода с необработанной поверхностью. Экспериментальные данные подтвердили стабильность микрорельефа при длительной эксплуатации.

Пятая глава посвящена исследованию методов повышения надежности оболочек рентгеновских трубок в условиях увеличенной тепловой нагрузки, а также разработке металлостеклянной оболочки с выходным бериллиевым окном.

Существенное влияние на качество изображения, его четкость и информативность оказывает рентгеновское афокальное излучение, возникающее в результате бомбардировки анода вторичными электронами. В случае стеклянной оболочки рентгеновской трубки, помимо ухудшения рентгенооптических

характеристик излучателя, вторичная эмиссия электронов приводит к образованию электроотрицательного заряда на диэлектрической поверхности оболочки, что уменьшает её электрическую прочность.

Также в процессе работы рентгеновской трубки материал оболочки в районе расположения катодного узла подвержен как тепловому воздействию от нагретого эмиттера, так и радиационному нагреву. Тепловой поток приводит к локальному растрескиванию горячей поверхности стекла, что может стать причиной возникновения электрических пробоев и нарушения целостности вакуумной оболочки. Осаждение испаренного металла на оболочку рентгеновской трубки может приводить к возрастанию тока утечки между электродами. Это нарушает стабильность работы рентгеновской трубки при высоком напряжении. Применение металлостеклянной конструкции оболочки исключает возможность выхода из строя РМТ по перечисленным выше причинам.

Наименее прочным звеном металлостеклянной оболочки является спай между металлом и стеклом. С целью определения механической прочности металлостеклянной оболочки в условиях тепловой и вибрационной нагрузок выполнен расчет внутренних напряжений, образующихся в спае между металлической обечайкой и стеклянной ножкой оболочки по общему выражению

$$P = F \cdot \delta \quad (4)$$

где δ – разность относительных значений теплового расширения стекла и металла при температуре затвердевания стекла, F – функция размеров и механических характеристик металла и стекла.

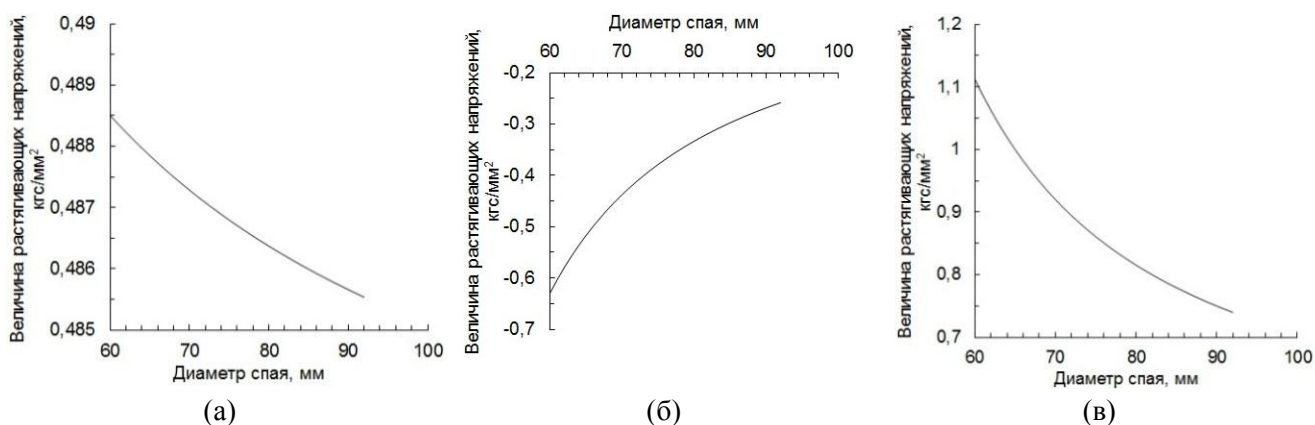


Рисунок 7 – Зависимости аксиальной (а), радиальной (б) и тангенциальной (в) составляющих внутренних напряжений металлостеклянного спае от величины диаметра спае. Для стекла марки 8245 толщиной 2 мм, ковара 29НК толщиной 1 мм.

На основании анализа расчетных зависимостей и экспериментальных исследований предложена конструкция металлостеклянного соединения, обеспечивающая его механическую прочность (рис. 7). С целью защиты

металлостеклянного спая от интенсивного воздействия теплового и рентгеновского излучения используется экран.

Создание и сохранение вакуума внутри рентгеновской трубки в течение всего ресурса, во многом связано с узлом откачки и техникой герметизации оболочки. Вакуумирование оболочки рентгеновской трубки традиционно производится через стеклянную откачную трубку – штенгель. При достижении определенного давления, производится отпайка рентгеновской трубки от вакуумной системы с использованием газопламенной горелки.

Для надежного и воспроизводимого отпая штенгеля, применяются стеклянные трубки с диаметром проходного сечения уменьшенным до 5-6 мм при внешнем диаметре 10-12 мм. Нагрев стекла и приведение его в вязкое состояние при отпайке также ведет к выделению значительного количества растворенного газа, попадающего в оболочку. Применение медной трубки в качестве штенгеля позволяет производить отпай без нагрева материала стенок трубки. Также увеличивается эффективное сечение откачки за счет возможности использования штенгеля с проходным диаметром 8-10 мм.

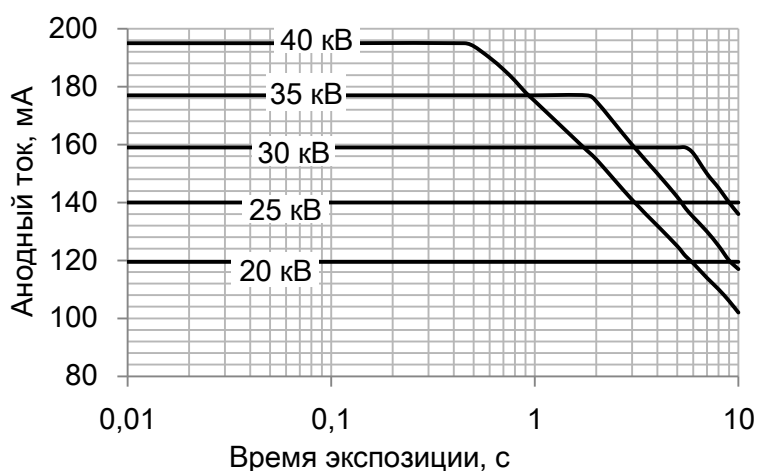
Анализ расчетных данных показывает, что проводимость медного штенгеля на 2 – 3 порядка выше проводимости используемых ранее стеклянных штенгелей сравнимого диаметра. С целью обеспечения надежного пережима медного штенгеля разработана конструкция откачного узла РМТ, подтвержденная решением о выдаче патента РФ на полезную модель по заявке № 2013132406, и методика холодного отпая. Сочетание конструктивных решений, найденных в результате исследований и проведенных расчетов, позволило обеспечить сохранение вакуума, достаточного для долговременной и безотказной работы РМТ и получение рентгеновского излучения требуемого качества.

В шестой главе приведены результаты ресурсных испытаний разработанной РМТ.

Испытания проводились в наиболее нагруженном режиме при номинальном напряжении 28 кВ, максимальном анодном токе 150 мА, времени экспозиции 6 сек. и паузой между экспозициями 2 мин. Каждые 1000 циклов проводилось измерение мощности дозы с целью определения величины его снижения. С той же периодичностью проводились снимки фантомов для определения качества получаемых снимков. Продолжительность ресурсных испытаний составила 25 тыс. включений.

Мощность дозы рентгеновского излучения в конце ресурсных испытаний уменьшилась на 20 %. После ресурсных испытаний РМТ была вскрыта для оценки состояния рабочей поверхности анода. Анализ рабочей поверхности анодного диска

позволил сделать вывод о снижении величины износа в области фокусной дорожки по сравнению с не модифицированной поверхностью анода. Уровень звукового шума РМТ по окончании испытаний возрос на 8 % по сравнению с первоначальным значением и составил 53 дБ, что является приемлемым согласно санитарным нормам № 3057-84.



(а)

(б)

Рисунок 8 – Разработанная РМТ для маммографического аппарата сканирующего типа (а) и её нагрузочная характеристика для фокусного пятна 0,3 мм и частоты вращения анодного диска 9000 об/мин.

Результаты исследования рентгенооптических характеристик рентгеновской трубки подтвердили её разрешающую способность в 10 пар линий на мм, что соответствует поставленной задаче. Анализ рентгеновских снимков стандартизированного маммографического фантома показал хорошую различимость микрокальцинатов размером до 240 мкм, что является приемлемым в диагностических целях согласно международным требованиям к маммографическим аппаратам.

В результате проделанной работы была разработана рентгеновская маммографическая трубка для сканирующих рентгеновских маммографических аппаратов полностью удовлетворяющая условиям работы в аппаратах данного типа (рис. 8).

Основные выводы и результаты

1. На основании теоретических и экспериментальных исследований разработана РМТ нового поколения для РМА сканирующего типа.
2. Разработана и внедрена в производство технология повышения эффективности электродов рентгеновских трубок, методом обработки их рабочих поверхностей короткоимпульсным лазерным излучением в жидких средах. Достигнуто увеличение мощности дозы рентгеновского излучения в РМТ на 18 %. Увеличен ресурс анода на 25 %.

3. На основании расчетных данных и экспериментальных исследований разработана конструкция двухфокусного катода для РМТ с улучшенными электрооптическими и эмиссионными характеристиками.
4. На основании исследования вибрационных характеристик узлов вращения рентгеновских трубок и расчетных данных разработана конструкция узла вращения РМТ, обеспечивающая безрезонансную работу рентгеновской трубки на частотах вращения до 9000 об/мин.
5. На основании расчетных данных и экспериментальных исследований тепловых процессов в узлах вращения рентгеновских трубок разработаны тепловые барьеры, обеспечивающие снижение рабочей температуры подшипников на 30%.
6. Разработана технология вакуумирования РМТ с использованием композиционного анода с титановым основанием в качестве геттера.

Публикации автора в журналах, рекомендованных ВАК

1. **Столяров И.Н.** Уменьшение рабочей температуры подшипников рентгеновской трубки [Текст] // Медицинская техника. – 2012. – №5. – С. 34–37.
2. **I.N. Stolyarov, E.V. Barmina, E. Stratakis, M. Barberoglou, V.N. Stolyarov, C. Fotakis, G.A. Shafeev** Laser-assisted nanostructuring of Tungsten in liquid environment (Лазерно-стимулированное наноструктурирование вольфрама в жидкой среде) [Text] // Applied Surface Science. – 2012. – Vol. 258, N 15. – P. 5898–5902.
3. **Столяров И.Н.** Опыт применения метода вибродиагностики для анализа качества рентгеновских трубок с вращающимся анодом [Текст] / Столяров И.Н., Столяров В.Н., Лобанов И.С. // Медицинская техника. – 2012. – №3. – С. 40–44.
4. **I.N. Stolyarov, E.V. Barmina, A.A. Serkov, E. Stratakis, C. Fotakis, V.N. Stolyarov, G.A. Shafeev** Nano-textured W shows improvement of thermionic emission properties (Наноструктурированный W показывает улучшение свойств термоэлектронной эмиссии) [Text] // Applied Physics A: Materials & Science Processing. – 2012. – Vol. 106, N 1. – P. 1–4.
5. **Столяров И.Н.** Использование новых конструкционных материалов при изготовлении вращающихся анодов диагностических рентгеновских трубок [Текст] / Столяров И.Н., Коноплев Е.Е., Столяров В.Н. // Медицинская техника. – 2011. – №5. – С. 6–11.

Публикации автора в других изданиях

6. **Столяров И.Н.** Разработка и исследование маммографической рентгеновской трубки [Текст] / Столяров И.Н., Столяров В.Н. // Материалы Невского радиологического форума 2013, Санкт-Петербург. – 2013. – С. 224.
7. **Столяров И.Н.** Методы улучшения теплового режима узла вращения рентгеновских трубок [Текст] // Материалы VI Всероссийского национального конгресса лучевых диагностов и терапевтов «Радиология-2012», Москва. – 2012. – С. 562–563.

Средства интеллектуальной собственности

8. **Столяров И.Н., Столяров В.Н.** Решение о выдаче патента РФ на полезную модель «Штенгельный узел рентгеновской трубки» по заявке № 201313240 от 15.07.13.