

На правах рукописи



**ПОТРАХОВ ЮРИЙ НИКОЛАЕВИЧ**

**МАЛОДОЗОВЫЙ МИКРОФОКУСНЫЙ  
РЕНТГЕНОДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ  
НЕОНАТОЛОГИИ В НЕСПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ УСЛОВИЯХ**

Специальность 05.11.17

«Приборы, системы и изделия медицинского назначения»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2020

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **Грязнов Артем Юрьевич**, профессор кафедры электронных приборов и устройств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **Таубин Михаил Львович**, главный научный сотрудник Федерального государственного унитарного предприятия «Научно-исследовательский институт научно-производственного объединения «Луч», г. Москва;  
кандидат технических наук **Подымский Алексей Артурович**, заместитель директора по сборочному производству АО «Светлана-Рентген», г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация:

АО «Инновационный Центр «Буревестник», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 25 декабря 2020 года в 15 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.10 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» и на сайте университета [www.etu.ru](http://www.etu.ru) в разделе «Подготовки кадров высшей квалификации» - «Объявление о защитах»

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

Автореферат разослан 23 октября 2020 года.

Ученый секретарь совета по защите  
докторских и кандидатских диссертаций



Е.В. Садыкова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы** обусловлена тем, что ежегодно недоношенными появляются на свет до 10% от общего числа новорожденных. Среди множества заболеваний, которые могут быть у недоношенного ребенка, одним из наиболее существенных в настоящее время признается ателектаз легкого. Основу инструментальной диагностики ателектаза в настоящее время составляет рентгенография легких. В случае с недоношенными детьми диагностика должна проводиться в кювезе - специально оборудованном боксе, позволяющем обеспечить необходимые уровни оксигенации, влажности, температуры, а также питание и подачу лекарств. Проведение рентгенографии органов грудной клетки в этом случае является клинически значимой проблемой, поскольку оценка степени расправления легких имеет решающее значение при определении жизнеспособности таких пациентов и выборе тактики лечения. В настоящее время не существует специализированных серийно выпускаемых рентгеновских аппаратов для решения указанных задач. Исследования проводятся на палатных аппаратах для общей диагностики, что ведет к снижению информативности получаемых снимков и может вызвать повышенную радиационную нагрузку на медперсонал и находящихся рядом, например, в соседних кювезах пациентов.

При этом проведение рентгенографии новорожденных очень востребовано. По данным ГБУЗ «Детская городская больница №1» (Санкт-Петербург) только в ее реанимационных отделениях ежегодно проводится около 4500 рентгенологических процедур в 2-х или 3-х проекциях. В общей сложности выполняется до 10 тыс. рентгеновских снимков в год.

Научный задел, созданный благодаря работам Н.Н. Блинова (ст.), Н.Н. Блинова (мл.), А.Ю. Васильева, М.И. Зеликмана, С.А. Иванова, Н.А. Карловой, В.В. Ключева, Б.И. Леонова, А.И. Мазурова, Н.Н. Потрахова, Г.И. Прохвятилова, Н.А. Рабухиной, Р.В. Ставицкого, М.Л. Таубина и др. – позволяет решить эту весьма актуальную проблему и внедрить в клиническую практику новый высокоэффективный метод рентгенодиагностических исследований в неонатологии.

Результаты работ последних лет, проводившихся при участии автора на кафедре электронных приборов и устройств СПбГЭТУ, позволили сформулировать **цель диссертационного исследования** – разработка и внедрение в клиническую практику специализированного малодозового аппаратно-программного рентгенодиагностического комплекса для неонатологии.

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

- проведено обзорное исследование современных методик рентгенодиагностических исследований новорожденных в нестационарных условиях, а также технических средств для их реализации;

- проведены экспериментальные и теоретические исследования, в результате которых разработана методика малодозовой микрофокусной рентгеновской съемки для неонатологии в неспециализированных условиях;

- разработан прототип рентгенодиагностического комплекса для неонатологии в неспециализированных условиях, состоящего из моноблочного микро/острофокусного источника излучения в портативном исполнении, цифровой системы визуализации изображения, штативного устройства и специализированного программного обеспечения;

- проведены технические испытания прототипа комплекса, подготовлена эскизная конструкторская и технологическая документация на комплекс;

- проведены теоретические и экспериментальные исследования по оценке величины радиационной нагрузки на пациентов и персонал.

**Объект исследования** – методы и системы рентгенодиагностики в неонатологии.

**Предмет исследования** – методика малодозовой микрофокусной рентгенодиагностики в неонатологии и технические средства ее реализации.

При решении поставленных задач применялись следующие **методы исследования:** анализ достижений в области применения рентгеновской аппаратуры с фокусным пятном микронных размеров, математическое моделирование процесса рентгенодиагностики, различные способы экспериментальных исследований, в ходе которых были созданы, апробированы и клинически и испытаны новые аппаратно-программные комплексы для микрофокусной рентгенодиагностики.

**В процессе работы были получены новые научные результаты:**

- показано, что рентгенодиагностические комплексы, используемые в настоящее время для диагностики возможных патологий недоношенных новорожденных и сопутствующих отклонений, не в полной мере удовлетворяют современным требованиям по информативности получаемых рентгеновских изображений, а также по удобству использования в целом;

- разработана методика малодозовой цифровой микрофокусной рентгенографии в неонатологии, которая позволяет повысить качество рентгенодиагностических процедур и оперативность их проведения;

- создан аппаратно-программный рентгенодиагностический комплекс для неонатологии, по ряду параметров существенно превосходящий применяемую в настоящее время для этих целей аппаратуру;

- показано, что применение микрофокусной рентгенодиагностики в неонатологии позволяет снизить дозу облучения на пациента и персонал; это коррелирует с данными применения метода цифровой микрофокусной рентгенографии в других областях рентгенологии;

- проведены испытания разработанного аппаратно-программного рентгенодиагностического комплекса, показавшие, что методика его применения имеет серьезные перспективы внедрения в клиническую практику.

**Практическая значимость работы** определяется тем, что:

- в развитие технологии цифровой микрофокусной рентгенографии показана возможность ее внедрения в еще одну область медицинской диагностики;

- предлагаемая методика рентгенодиагностики в неонатологии позволяет обеспечить повышение качества и информативности исследований с одновременным снижением трудоемкости их проведения;

- использование при создании аппаратно-программного рентгенодиагностического комплекса для неонатологии в неспециализированных условиях решений, апробированных на разработанных ранее аппаратах для микрофокусной рентгенографии, позволяет обеспечить его надежность и высокие эксплуатационные качества;

- проведены технические испытания и осуществлена подготовка к серийному производству первого отечественного специализированного аппаратно-программного рентгенодиагностического комплекса для неонатологии;

- подтверждена возможность снижения радиационной нагрузки в ходе проведения рентгенодиагностических процедур с применением микрофокусной аппаратуры.

В результате выполненных экспериментальных и теоретических исследований на защиту выносятся следующие **научные положения**:

1. Внедрение в практику мобильного аппаратно-программного рентгенодиагностического комплекса для оперативного проведения диагностики новорожденному непосредственно в кювезе существенно снижает риски осложнений по сравнению со стандартной методикой рентгенографии.

2. Цифровая микрофокусная рентгенография в ходе проведения рентгенодиагностических исследований в неонатологии при соответствующих условиях съемки позволяет снизить радиационную нагрузку на пациентов и персонал до 1,5 раз.

3. Использование цифровой микрофокусной рентгенографии в неонатологии не приводит к снижению информативности изображений новорожденных, а при съемке с увеличением отдельных участков тела может повысить информативность до 20% и более по сравнению с традиционной контактной съемкой.

Личный вклад в работу выражается в том, что при непосредственном участии автора была проведена разработка первого отечественного аппаратно-программного рентгенодиагностического комплекса для неонатологии. В настоящее время комплекс проходит серию исследовательских испытаний в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова» (ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова»). Научные и технические результаты, полученные в ходе диссертационной работы, в настоящее время внедрены в процесс подготовки магистров на кафедре электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ», а также применяются при проведении фундаментальных и прикладных научных исследований, проводимых на кафедре.

Работа прошла широкую **апробацию**, ее основные результаты докладывались и обсуждались на многочисленных конференциях различного уровня: VIII Невский радиологический форум (Санкт-Петербург, 2015), Российско-Германские научно-технические конференции по биомедицинской инженерии RGC (2016-2019), 70-74 научно-технические конференции, посвященные Дню радио (Санкт-Петербург, V международная научно-практическая конференция «Современные концепции научных исследований» (Москва, 2014), 2015-2018), II-V Всероссийские конференции производителей рентгеновской техники (Санкт-Петербург, 2015-2019).

**По теме диссертации опубликовано** 22 печатные работы (из них 4 в рекомендованных ВАК изданиях), получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ и 7 патентов на изобретения и полезные модели.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (53 наименований) и 3 приложений. Основная часть работы изложена на 135 страницах машинописного текста, содержит 87 рисунков и 17 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, изложены основные результаты, выносимые на защиту, приведена краткая аннотация содержания диссертации.

**Первая глава** посвящена описанию и сравнительному анализу современных методов и аппаратуры для рентгенодиагностики в неонатологии. Рентгенографию недоношенных детей осуществляют в родильных домах, реанимационных отделениях и палатах интенсивной терапии, поэтому предназначенный для этого аппарат должен быть мобильным или переносным.

На данный момент в мире практически не существует специализированных технических средств и методик для проведения рентгенологических обследований в данных условиях. Специализация выражается, главным образом, в использовании устройств, фиксирующих детей в необходимых проекциях между источником рентгеновского излучения и системой визуализации.



Рис. 1. Современные палатные аппараты, применяемые в неонатологии и педиатрии

Цифровые технологии визуализации рентгеновского изображения подняли неонатальную рентгенологию на более высокий уровень. Наряду с цифровыми палатными аппаратами общего назначения стали применяться цифровые аппараты, хоть и разработанные для неонатологии и педиатрии, но, по сути, мало чем отличающиеся от классических палатных аппаратов. Однако очевидно, что традиционные аппараты, вследствие больших габаритов, массы, а также неоптимизированных для съемки столь специфичных пациентов режимов работы не могут являться долгосрочным решением проблемы.

В то же время специализированные аппараты, предназначенные для работы в описанных условиях, ни в России, ни за рубежом в настоящее время не производятся. Решение указанной задачи может заключаться в использовании технологии микрофокусной рентгенографии, основы которой были предложены более 30 лет назад в нашей стране.

**Во второй главе** рассмотрены физико-технические особенности применения методики цифровой микрофокусной рентгенографии в неонатологии.

Традиционно рентгенография в неонатологии выполняется контактным способом съемки стандартной рентгенографии. В этом случае используется источник излучения с протяженным фокусным пятном, а объект съемки располагается на достаточно большом расстоянии от источника излучения и вплотную с приемником излучения. Незначительное удаление приемника от объекта съемки приводит к существенному увеличению нерезкости. В общем случае отношение расстояний  $f$  (источник-приемник) и  $f_1$  (источник-объект) определяет коэффициент увеличения изображения объекта  $m=f/f_1$ ; при контактной съемке  $f \approx f_1$  и  $m \approx 1$ .

При съемке с фокусным пятном микронных размеров (согласно ГОСТ 22091.9-86 – менее 100 мкм) независимо от того, в каком положении находится объект съемки в пространстве между фокусным пятном источника и плоскостью приемника, резкость полученного изображения сохраняется. Использование цифровой микрофокусной рентгенографии при проведении рентгенодиагностических исследований в неонатологии позволяет достичь традиционных преимуществ микрофокусной рентгенографии: эффектов увеличения контраста и глубины резкости, а также снижения экспозиционной дозы.

Основной параметр, влияющий на информативность рентгеновских снимков – разрешающая способность – для рентгенографических систем, которые используют источник излучения с протяженным фокусным пятном, ограничивается разрешающей способностью приемника изображения. Для подавляющего большинства современных цифровых приемников для общей рентгенологии она не превышает нескольких пар лин./мм. Как показывает практика, для рентгенодиагностики в неонатологии этого недостаточно. Решение указанной проблемы при проведении рентгенологических обследований на цифровых аппаратах в неонатологии заключается во включении в их состав микрофокусных источников излучения для выполнения прицельных снимков с увеличением изображения.

Теоретически для заданных значений диаметра фокусного пятна рентгеновской трубки  $d$  и разрешающей способности приемника  $R_{\Pi}$  существует оптимальное увеличение изображения

$$m_0 = \frac{(dR_{\Pi})^2 + 1}{(dR_{\Pi})^2}, \quad (1)$$

при котором обеспечивается максимальная разрешающая способность рентгенографической системы в составе источника рентгеновского излучения и приемника рентгеновского изображения

$$R_{\text{макс}} = \sqrt{R_{\Pi}^2 + \left(\frac{1}{d}\right)^2} = R_{\Pi} \sqrt{m_0}. \quad (2)$$



Ниже показаны результаты расчета зависимости значения разрешающей способности рентгенографической системы от размера фокусного пятна.

Таблица 1.

Зависимость разрешающей способности системы от диаметра фокусного пятна

$d$ , мм	1	0,8	0,5	0,2	0,1
$m_0$	1,0	1,1	1,3	3,0	9,2
$R_{\text{макс}}$ пар лин./мм	3,6	3,7	4,0	6,1	10,6

Таким образом, при фокусном пятне  $d = 0,1$  мм для приемника изображения с разрешением 3,5 пар лин./мм при съемке с увеличением изображения можно получить почти в три раза большую разрешающую способность. Следовательно, оснащение цифровых рентгенографических систем микрофокусными источниками излучения для получения увеличенных изображений области интереса повысит их диагностические возможности по распознаванию мелких и соответственно малоконтрастных структур объекта исследования.

Результаты теоретических и практических исследований позволяют сформулировать требования к микрофокусному рентгенодиагностическому комплексу для неонатологии.

1. При создании технологии цифровой микрофокусной рентгенографии в неонатологии необходимо неукоснительно соблюдать принцип ALARA (минимизации нагрузки для получения достоверного диагноза).

2. Учитывая неконтролируемую подвижность новорожденных, а также высокую частоту их сердечных сокращений (до 130 ударов в минуту и более), время экспозиции должно быть минимальным (до 0,1 сек), напряжение рентгеновской трубки  $50 \div 70$  кВ и ток –  $1 \div 3$  мА.

3. Для реализации преимуществ микрофокусной рентгенографии необходимо использовать плоскопанельные двухкоординатные детекторы (DR-технологии), а не экраны с фотостимулируемым люминофором, поскольку:

- при исследовании необходимо иметь столько кассет с экраном, сколько выполняется снимков, что в неспециализированных условиях, например, в родильном зале, как правило, затруднительно;

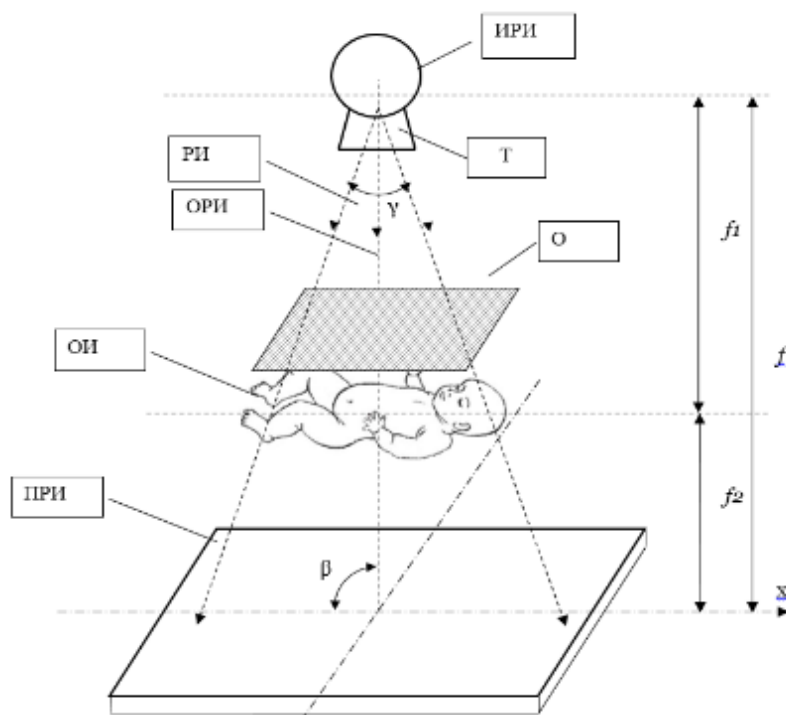
- CR-технология не позволяет оперативно оценить качество снимка, так как большинство CR-систем визуализации требует переноса кассеты в считывающее устройство и ее достаточно длительное сканирование;

- квантовая эффективность экранов с фотостимулируемым люминофором ограничена величинами 0,3 – 0,5, в то время как квантовая эффективность плоскопанельных детекторов уже приблизилась к 0,8 – 0,9.

4. Вес палатного аппарата с передвижным штативом не должен превышать 100-150 кг, а портативного (удерживаемого в руках) -  $4 \div 5$  кг, что позволит осуществлять работу с аппаратом одному человеку.

**В третьей главе** показаны специфические конструктивные особенности разработанного аппаратно-программного микрофокусного рентгенодиагностического комплекса, рассмотрены и обоснованы технические и технологические решения, позволившие обеспечить соответствие экспериментальных образцов аппаратуры предъявляемым требованиям.

При создании аппаратно-программного рентгенодиагностического комплекса для неонатологии впервые в практике отечественной медицинской рентгенографии было дано полное описание термина «рентгенооптическая схема съемки» (РОС) с определением всех задаваемых при рентгенографии геометрических параметров.



- ИРИ – источник рентгеновского излучения;
- Т – тубус ИРИ;
- ОРИ – ось пучка РИ;
- О – поле облучения;
- ОИ – объект исследования;
- ПРИ – приемник рентгеновского изображения;
- $f_1$  – расстояние от ИРИ до ОИ;
- $f_2$  – расстояние от ОИ до ПРИ;
- $f$  – расстояние от ИРИ до ПРИ;
- $\gamma$  – угол раствора пучка РИ;
- $\beta$  – угол между ОРИ и плоскостью ПРИ.

Рис. 2. Рентгенооптическая схема съемки при проведении рентгенологического обследования в неонатологии

Предложено под термином РОС понимать взаимное расположение в пространстве источника рентгеновского излучения (ИРИ), объекта исследования (ОИ) и приемника рентгеновского изображения (ПРИ) с указанием следующих геометрических параметров съемки: расстояния от ИРИ до ОИ (фокусное расстояние); расстояния от ОИ до ПРИ; расстояния от ИРИ до ПРИ (РИП); направления распространения рентгеновского излучения; угол между осью пучка и плоскостью входного окна ПРИ; угол раствора пучка рентгеновского излучения; поле облучения (размер облучаемой поверхности ОИ).

Описанные схемы съемки и способы укладки использовались при проведении практических исследований по отработке методики микрофокусной съемки новорожденных при проведении рентгеновской съемки.

Предварительные исследования предложенной методики проведения рентгенодиагностики в неонатологии проводились с использованием макета портативного рентгеновского аппарата на фантоме новорожденного PH-50 Newborn Whole Body Phantom (рис.3).



Рис. 3. Рентгеновская съемка фантома новорожденного на различные приемники

Эксплуатация макета выявила необходимость решения ряда задач:

1. Повысить КПД источника не менее чем до 70%. Задача решена использованием резонансной схемы питания высоковольтного узла источника.

2. Обеспечить возможность точного управления величиной напряжения на рентгеновской трубке. Задача решена благодаря введению регулировки анодного напряжения по двум каналам – изменением резонансной частоты и скважности управляющих импульсов.

3. Увеличить мощность рентгеновского аппарата на порядок – до 100 Вт, при этом размер фокусного пятна необходимо сохранять минимально возможным. Задача решена использованием модернизированной рентгеновской трубки с массивной мишенью и дополнительным фокусирующим электродом.

4. Создать интерфейс управления с целью согласования работы рентгеновского аппарата с другими компонентами комплекса, в первую очередь – системой визуализации. Задача решена путем разработки специального протокола обмена данными, реализованного посредством Ethernet-интерфейса.

В ходе решения указанных задач был разработан специализированный цифровой рентгенодиагностический комплекс «ПАРДУС-Нео» в портативном исполнении в составе рентгеновского аппарата семейства «ПАРДУС» на основе трехэлектродной рентгеновской трубки (0,39БДМ17-70) с максимальным анод-

ным напряжением 65 кВ (рис. 5) и системы визуализации рентгеновского изображения на основе плоскопанельного двухкоординатного твердотельного детектора.

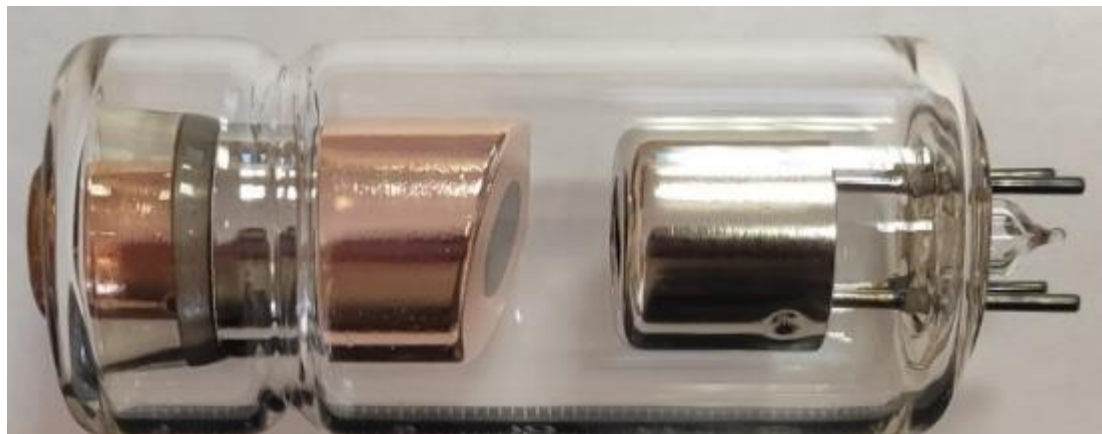


Рис. 4. Модернизированная рентгеновская трубка с массивной «внутренней» мишенью и фокусирующим электродом



а



б

Рис. 5. Рентгеновский аппарат в портативном исполнении (а) и многофункциональный передвижной штатив (б) рентгенодиагностического комплекса

Штатив для удобства работы оператора в стационарных условиях оснащен газлифтом, на котором крепится моноблок аппарата. Для съемки в неспециализированных условиях (машина скорой помощи, реанимационное отделение и т.д.) моноблок может быть оперативно снят со штатива.

**В четвертой главе** описан опыт апробации аппаратно-программного комплекса.

В первой части даны оценки радиационной нагрузки на пациента и персонал в ходе проведения съемки в неонатологии. Показаны особенности расчета доз в неспециализированных условиях, приведен сравнительный анализ экспериментальных и теоретических данных. Результаты исследований свидетельствуют о высокой вариабельности как индивидуальных, так и стандартных (типичных) эффективных доз облучения пациентов детского возраста. Несмотря на достаточно большой объем методических указаний МУ 2.6.1.3387-16, вопрос обеспечения радиационной безопасности при проведении обследований новорожденных весом от 500 грамм в них отдельно не рассмотрен, отсутствуют сведения о референтных уровнях облучения и методике их оценки.

Для оценки радиационной нагрузки на пациента при проведении рентгенологических обследований совместно со специалистами ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева были проведены исследования, в ходе которых значения эффективных доз рассчитывались с помощью компьютерной программы EDEREX (ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева), а также программы RCXMS 2,0 (СТУК, Финляндия). Расчеты эффективной дозы проводились для условного пациента, имеющего полный набор мужских и женских органов. В качестве моделей были использованы антропоморфные гетерогенные фантомы в возрасте от новорожденного и до 1 года, стандартные такого рода расчетов.

Таблица 2.

«Стандартные» антропометрические характеристики пациентов в возрасте до 1 года

Возраст, лет	Вес, кг	Рост, см	Размеры торса, см	
			Передне-задний	Боковой
0	3,5	51,5	9,8	12,7
1	9,3	75	13	17,6

Кроме того, в ходе соответствующих исследований для оценки эффективной дозы недоношенных новорожденных с экстремально низкой массой тела была сделана выборка из 10 недоношенных пациентов (табл. 3).

Таблица 3.

Усредненные антропометрические характеристики недоношенных новорожденных

Число пациентов	Масса тела, кг	Рост, см	Возраст, дней
10	0,83±0,14 (0,75 – 1,15)	32,0±3,0 (28 – 38)	23,0±6,0 (12 – 30)

Оценка максимальной экспозиции и эффективной дозы проводилась в режимах работы рентгеновского аппарата, рекомендованных по итогам предварительных испытаний макета на препаратах тел новорожденных - напряжение в диапазоне 50-70 кВ, экспозиция одного снимка до 0,15 мАс. В соответствии с разработанными рентгенооптическими схемами съемки исследования проводились для двух различных вариантов укладок пациента: моноблок аппарата удален на определенное расстояние от кожи пациента и тубус моноблока аппарата приближен вплотную к коже пациента.

Первый вариант укладки реализует схему контактной рентгеновской съемки, которая используется для получения рентгеновского изображения всего тела пациента. Расстояние источник-приемник (РИП)  $f$ , равное 40 см, выбирается с учетом размеров приемника и угла раствора пучка рентгеновского излучения. При формате приемника 35×45 см (характерный размер пикселя 150 мкм) максимальное поле облучения составляет 18×24 см. Второй вариант укладки (РИП = 15 см) предполагает схему съемки с увеличением рентгеновского изображения пациента. В первом случае рентгеновской съемки снимки пациентов выполнялись в передне-задней (ПЗ), задне-передней (ЗП) и боковой проекциях. Значения эффективных доз облучения новорожденных, получаемые в результате рентгеновской съемки на комплексе в портативно-передвижном исполнении, представлены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4.

Эффективные дозы новорожденных (передвижное исполнение)

Напряжение, кВ	Экспозиция одного снимка, мАс	РИП, см	Эффективная доза, мЗв, (П. МКРЗ №60)	Эффективная доза, мЗв, (П. МКРЗ №103)
65	0,145	40	0,03	0,029
65	0,0725	40	0,015	0,014
65	0,0435	40	0,009	0,009
65	0,0145	40	0,003	0,003

Таблица 5.

Эффективные дозы новорожденных (портативное исполнение)

Напряжение, кВ	Экспозиция одного снимка, мАс	РИП, см	Эффективная доза, мЗв, (П. МКРЗ №60)	Эффективная доза, мЗв, (П. МКРЗ №103)
65	0,145	15	0,27	0,34
65	0,0725	15	0,14	0,17
65	0,0435	15	0,08	0,10
65	0,0145	15	0,03	0,03



Установлено, что эффективные дозы пациентов на РИП = 40 см существенно ниже (вплоть до порядка величины) по сравнению с аппаратом Mobelett XP Digital, использованным в качестве референтного (эффективная доза 0,08 мЗв (по Публикации МКРЗ №60) и 0,09 мЗв (по Публикации МКРЗ №103). При этом, даже на РИП = 15 см при максимальном значении экспозиции – 0,145 мАс, значения эффективной дозы попадают в категорию «пренебрежимо малый диапазон радиационного риска».

Во второй части главы описана опытная эксплуатация комплекса и ее результаты, дана оценка информативности полученных снимков, приведен статистический материал.

Качество изображений оценивалось с помощью тестов для оценки контрастной чувствительности (алюминиевый клин) и разрешающей способности (дуплексный эталон).



Рис. 6. Рентгеновский снимок антропоморфного гетерогенного фантома

Кроме того, с помощью разработанного макета, проведено обследование 14 препаратов новорожденных. Полученные изображения были представлены врачам-экспертам с опытом работы в рентгенологии не менее 5 лет. Эти изображения сравнивались с изображениями из базы данных пациентов с аналогичными ростовыми показателями, выполненными на палатном аппарате Siemens Mobelett XP Digital методом стандартной рентгенографии.



Рис. 7. Рентгеновская съемка препаратов тел новорожденных

Для оценки качества рентгеновских изображений грудной клетки, использовался метод субъективной экспертной оценки. Оценка проводилась по шкале от «0» до «3». При этом число «0» означает – «оценить не представляется возможным», число «1» – «удовлетворительно», число «2» – «хорошо», число «3» – «отлично». Результаты сравнения изображений, полученных на стационарном и портативном микрофокусном рентгеновских аппаратах, представлены в таблице 6.

По итогам всех сравнительных испытаний подтверждено, что приемник рентгеновского изображения на основе широкоформатного твердотельного детектора обеспечивает требуемое качество изображений при использовании портативного источника рентгеновского излучения.

Проведенный сравнительный анализ рентгенограмм, полученных с помощью разработанных технических средств и рентгенограмм, полученных на стационарном рентгенодиагностическом аппарате, показал, что оценка и описание одних и тех же органов на микро- и острофокусных рентгенограммах по сравнению с традиционными не вызывает дополнительных трудностей, а информативность микрофокусных снимков, как минимум, не уступает традиционным.





(a)



(б)

Рис. 8. Рентгеновские снимки препарата тела новорожденного (а) и мертворожденного (б)

Таблица 6.

## Сравнение рентгеновских изображений

Критерии качества изображения ОГК:	Mobilett XP	Микрофокусный рентгеновский аппарат
– четкая видимость контуров позвоночника, грудного отдела аорты, трахеи и главных бронхов	$2,95 \pm 0,01$	$2,98 \pm 0,02$
– визуализация легочных сосудов в межреберье	$2,95 \pm 0,01$	$2,96 \pm 0,02$
– визуализация легочных сосудов на фоне ребер, сердца и диафрагмы	$2,02 \pm 0,02$	$2,06 \pm 0,01$
– визуализация мелкоочаговых изменений легочного рисунка диаметром 1–2 мм	$1,76 \pm 0,03$	$1,97 \pm 0,03$
– на РГ ОГК визуализируются верхушки легких, купола диафрагмы и реберно-диафрагмальные синусы	3	3
Общее качество визуализации:		
– легочной ткани	$2,01 \pm 0,03$	$2,04 \pm 0,02$
– средостения	$2,06 \pm 0,04$	$2,07 \pm 0,03$
– костной структуры	$2,06 \pm 0,05$	$2,97 \pm 0,02$

Для примера на рисунке 9 представлены рентгеновские снимки грудного отдела (пациент Ф., возраст 7 мес., вес 3,5 кг), полученные в условиях стационарного рентгеновского кабинета ГБУЗ ДГБ №1, и полученные «на дому» у этого же пациента с помощью комплекса «ПАРДУС-Нео».

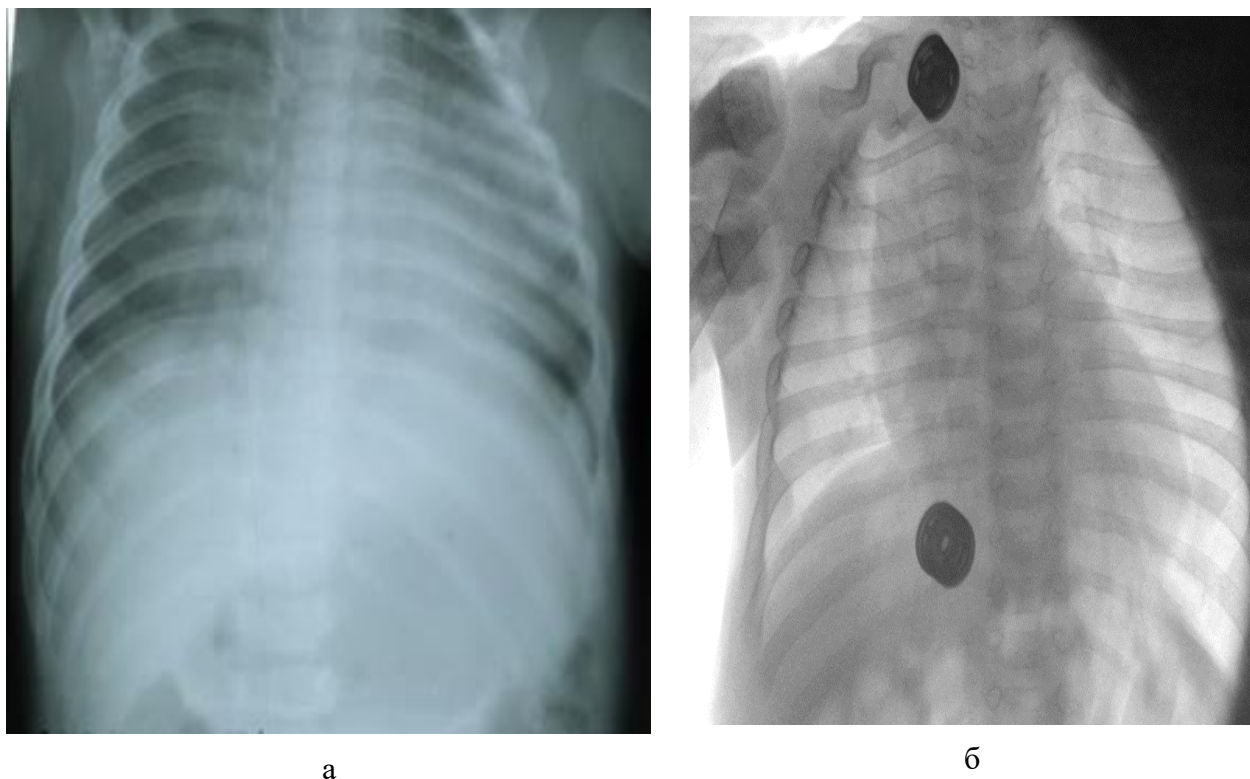


Рис. 9. Снимки в стационарных (а) и нестационарных (б) условиях

Также были отмечены: высокое качество и информативность рентгеновских изображений, что, несомненно, важно для выявления малоразмерных и малоконтрастных патологий у новорожденных; эффективность и удобство рентгенодиагностических исследований, обусловленных небольшими размерами и весом технических средств; низкая радиационная нагрузка на пациента и персонал, проводящий исследования.

В целом, благодаря возможности получения высокого диагностического качества рентгеновского изображения при обеспечении условий радиационной безопасности, можно утверждать, что разработанный отечественный аппаратно-программный цифровой микрофокусный рентгеновский комплекс является новым техническим средством рентгенодиагностики в неонатологии и педиатрии.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы:

- создан первый отечественный аппаратно-программный рентгенодиагностический комплекс, позволяющий оперативно и успешно решать задачи диагностики возможных патологий у недоношенных новорожденных и сопутствующих отклонений в нестационарных и неспециализированных условиях;

- разработана методика малодозовой цифровой рентгенографии для передвижного и портативного вариантов исполнения комплекса, позволяющая существенно повысить качество и информативность получаемых рентгеновских изображений;

- разработанный комплекс существенно превосходит традиционную аппаратуру по мобильности, эргономичности и простоте эксплуатации;

- по результатам независимой экспертной оценки эффективные дозы новорожденных пациентов при использовании методики микрофокусной рентгенодиагностики существенно ниже доз, получаемых при проведении исследований на используемых в настоящее время аппаратах;

- технические и исследовательские испытания комплекса показали, что предложенная на его основе методика рентгенографии имеет серьезные перспективы внедрения в клиническую практику.

В целом, созданный аппаратно-программный рентгенодиагностический комплекс для неонатологии, разработанные и апробированные для него рентгенооптические схемы съемки, соответствующие укладки, таблицы режимов рентгеновской съемки и рекомендации по их выбору для пациентов трех возрастов позволяют обеспечить необходимое качество и информативность получаемых рентгеновских снимков, а также радиационную безопасность персонала при проведении рентгенодиагностических исследований в нестационарных и неспециализированных условиях.

Следует особо отметить, что для всех исследованных режимов рентгеновской съемки (протоколов) новорожденных и пациентов младшего детского возраста значения эффективной дозы облучения соответствуют «пренебрежимо малому диапазону радиационного риска».

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК

1. Потрахов, Ю.Н. «Внутриротовая» микрофокусная рентгенография в ветеринарии / Ю.Н. Потрахов, Н.Н. Потрахов. – DOI 10.18127/j15604136-201805-15. // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2018. – № 5. – С. 47–49.
2. Мазуров, А.И. Современные технические средства рентгенодиагностики в неонатологии / А.И. Мазуров, Н.Н. Потрахов, Ю.Н. Потрахов. // Медицинская техника. – 2019. – № 1 (313). – С. 48–51.
3. Потрахов, Н.Н. Портативные технические средства рентгенодиагностики для стоматологии / Н.Н. Потрахов, Ю.Н. Потрахов. // Медицинская техника. – 2016. – № 6 (300). – С. 34–37.
4. Potrakhov, N.N. Technical means for X-ray diagnostic of newborns in non-specialized conditions / V.B. Bessonov, N.N. Potrakhov, Y.N. Potrakhov [et al.] – DOI 10.1063/1.5121930. // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2140, nr 020005 (2019). – С. [1–5] – URL: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5121930> (дата обращения: 13.07.2020).

### В изданиях, индексируемых в Scopus

1. Potrakhov, N.N. Technical means for X-ray diagnostic of newborns in non-specialized conditions / V.B. Bessonov, N.N. Potrakhov, Y.N. Potrakhov [et al.] – DOI 10.1063/1.5121930. // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2140, nr 020005 (2019). – P. [1–5] – URL: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5121930> (дата обращения: 13.07.2020).
2. Mazurov, A.I. Current X-ray diagnosis technology in neonatology / A.I. Mazurov, N.N. Potrakhov, Y.N. Potrakhov. – DOI 10.1007/s10527-019-09879-z. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10527-019-09879-z.pdf> (дата обращения: 13.07.2020).
3. Potrakhov, N.N. X-ray examinations of newborns / N.N. Potrakhov, Y.N. Potrakhov. – DOI 10.1088/1742-6596/967/1/012012. // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 967, nr 012012. – P. [1–4] – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/967/1/012012/pdf> (дата обращения: 13.07.2020).
4. Bessonov, V.B. About the features of the design of X-ray systems for nondestructive control in industry / V.B. Bessonov, A.V. Obodovskiy, Y.N. Potrakhov. – DOI 10.1088/1742-6596/967/1/012003 // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 967, nr 012003. – P. [1–5] – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/967/1/012003/pdf> (дата обращения: 13.07.2020).
5. Vasil'yev, A.Y. X-ray diagnostics in non-specialized conditions / A.Y. Vasil'yev, V.A. Lyubimenko, Y.N. Potrakhov [et al.] – DOI 10.1088/1742-6596/872/1/012049. // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 872, nr 012049. – P. [1–5] – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/872/1/012049/pdf> (дата обращения: 13.07.2020).
6. Potrakhov, N.N. Portable X-ray diagnostic devices for dentistry / N.N. Potrakhov, Y.N. Potrakhov. – DOI 10.1007/s10527-017-9666-y. // Biomedical Engineering. – 2017. – Vol. 50. – № 6 – P. 406–409. – URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10527-017-9666-y.pdf> (дата обращения: 13.07.2020).
7. Potrakhov, N.N. Portable technical equipment for X-ray diagnostics in unspecialized conditions / N.N. Potrakhov, Y.N. Potrakhov, A.Y. Vasil'yev [et al.] – DOI 10.1088/1742-6596/808/1/012014. // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 808, nr 012014. – P. [1–4] – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/808/1/012014/pdf> (дата обращения: 13.07.2020).

## **Монографии**

Потрахов, Н.Н. Микрофокусная рентгенография в медицине: монография / Н.Н. Потрахов, А.Ю. Васильев, Ю.Н. Потрахов [и др.] – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. – 91с.

## **Материалы конференций**

1. Microfocus X-Ray radiography in medicine: current state and prospects / M.Yu Shestopalov, Y.N. Potrakhov, N.N. Potrakhov // Proceedings of the 11th German-Russian Conference on Biomedical Engineering. – Aachen (Germany), 17-19 June 2015. – P. 65–67.

2. Conducting X-ray researches by portable technical equipment in unspecialized conditions / Y.N. Potrakhov, A.Y. Vasilev, V.A. Lyubimenko [et al.] // 12th Russian-German Conference on Biomedical Engineering (RGC-2016). – Suzdal, 4-7 July 2016.

3. Портативные технические средства рентгенодиагностики в неспециализированных условиях / Н.Н. Потрахов, Ю.Н. Потрахов, А.Ю. Васильев [и др.] // III Всероссийская научно-практическая конференция производителей рентгеновской техники. Программа и материалы конференции. – Санкт-Петербург, 25 ноября 2016. – С. 51–54.

4. Рентгенодиагностика в ветеринарной стоматологии / Д.В. Гайворонский, Н.Н. Потрахов, Ю.Н. Потрахов [и др.] // 20-я научно-техническая конференция «Медико-технические технологии на страже здоровья» («Медтех-2018») (Юбилейная). Сборник докладов. – Калабрия (Италия), 21-28 сентября 2018. – С. 66–69.

5. Современные технические средства рентгенодиагностики в неонатологии / А.И. Мазуров, Н.Н. Потрахов, Ю.Н. Потрахов // 20-я научно-техническая конференция «Медико-технические технологии на страже здоровья» («Медтех-2018») (Юбилейная). Сборник докладов. – Калабрия (Италия), 21-28 сентября 2018. – С. 72–74.

6. Возможности микрофокусной рентгенографии в диагностике патологии органов грудной клетки у детей раннего возраста / А.В. Алхазисвили, Л.Г. Константинова, Ю.Н. Потрахов [и др.] // VI Всероссийская научно-практическая конференция производителей рентгеновской техники. Программа и материалы конференции. – Санкт-Петербург, 28-29 ноября 2019. – С. 75–76.

7. Конструкция высокочастотного накального трансформатора для рентгеновских аппаратов / В.В. Клонов, Ю.Н. Потрахов, А.М. Володин. // VI Всероссийская научно-практическая конференция производителей рентгеновской техники. Программа и материалы конференции. – Санкт-Петербург, 28-29 ноября 2019. – С. 117–120.

8. Рационализация назначения компьютерной томографии органов грудной клетки детям раннего возраста врачами клинических специальностей по данным микрофокусной рентгенографии / А.В. Алхазисвили, Л.Г. Константинова, Ю.Н. Потрахов [и др.] // Конгресс российского общества рентгенологов и радиологов. Сборник тезисов. – Москва, 6-8 ноября 2019. – С. 11–12.

9. Technical means for x-ray diagnostic of newborns in non-specialized conditions / V.B. Bessonov, N.N. Potrakhov, Yu.N. Potrakhov [et al.] // Proceedings of the XIV Russian-German Conference on Biomedical Engineering (RGC-2019). – Saint-Petersburg, 3-6 July 2019.

10. X-ray diagnostics in non-specialized conditions / A.Y. Vasilyev, V.A. Lyubimenko, Y.N. Potrakhov [et al.] // 24th International Conference on Vacuum Technique and Technology – Saint-Petersburg, 6-8 July 2017.

## Патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

1. Патент №2717376 Российская Федерация, МПК G01T 1/29 (2006.01). Способ определения размера фокусного пятна рентгеновской трубки: № 2019124945 : заявл. 05.08.2019 : опубл. 20.03.2020. Бюл. № 9 / Потрахов Н.Н., Мазуров А.И., Гук К.К., Потрахов Ю.Н.; заявитель «ЛЭТИ». – [5] с. : ил. – Текст: непосредственный.

2. Патент №116143 Российская Федерация, МПКО 24-01. Штативное устройство для неонатального рентгеновского аппарата : № 2018505204 : заявл. 26.11.2018 : опубл. 20.08.2019 / Потрахов Н.Н., Грязнов А.Ю., Бессонов В.Б., Гук К.К., Дмитриев А.С., Потрахов Ю.Н.; заявитель «ЛЭТИ». – [7] с. : ил. – Изображение: непосредственное.

3. Патент №116189 Российская Федерация, МПКО 24-01. Неонатальный рентгеновский аппарат : № 2018505347 : заявл. 30.11.2018 : опубл. 22.08.2019 / Грязнов А.Ю., Бессонов В.Б., Гук К.К., Дмитриев А.С., Потрахов Ю.Н.; заявитель «ЛЭТИ». – [6] с. : ил. – Изображение: непосредственное.

4. Патент №2018612317 Российская Федерация. Программа управления многофункциональной рентгеновской установкой («NDScan») : № 2017663476 : заявл. 25.12.2017 : опубл. 15.02.2018 / Ободовский А.В., Бессонов В.Б., Ларионов И.А., Клонов В.В., Потрахов Ю.Н.; заявитель «ЛЭТИ». – [1] с. – Текст: непосредственный.

5. Патент №104685 Российская Федерация, МПКО. Прибор портативный для исследования проб зерна и семян : № 2016504493 : заявл. 10.11.2016 : опубл. 16.08.2017 / Белецкий С.Л., Уланин С.Е., Рассоха С.Н., Шалыгина Е.В., Потрахов Н.Н., Потрахов Ю.Н., Черенков А.А.; заявитель НИИПХ РОСРЕЗЕРВА. – [Изображение: непосредственное].

6. Патент №121142 Российская Федерация, МПК А61В 6/00 (2006.01), H01J 35/10 (2006.01). Рентгеновская трубка : № 2012104400/14 : заявл. 08.02.2012 : опубл. 20.10.2012. Бюл. № 29 / Потрахов Н.Н., Потрахов Ю.Н., Жамова К.К.; заявитель «Лаборатория рентгенодиагностических систем». – [8] с. : ил. – Текст: непосредственный.

7. Патент №122783 Российская Федерация, МПК G01T 1/29 (2006.01). Инспекционно-досмотровый комплекс : № 2012130371/28 : заявл. 17.07.2012 : опубл. 10.12.2012. Бюл. № 34 / Афонин П.Н., Зубов В.А., Потрахов Н.Н., Потрахов Ю.Н., Шишов Д.И.; заявитель «ЛЭТИ». – [5] с. : ил. – Текст: непосредственный.

8. Патент №191745 Российская Федерация, МПК А61D 99/00 (2006.01). Рентгеновский аппарат для ветеринарной стоматологии : № 2019100389 : заявл. 09.01.2019 : опубл. 19.08.2019. Бюл. № 23 / Потрахов Ю.Н.; заявитель «ЛЭТИ». – [7] с. : ил. – Текст: непосредственный.

ФГАОУ ВО

«Санкт-Петербургский государственный

электротехнический университет

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Подписано в печать 12.10.20. Формат 60x84/16

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ООО «КопиСервис»

Печать ризографическая. Заказ № 1/1012

П.л. 1.0. Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз.

ООО «КопиСервис»

197028, Санкт-Петербург, Шуваловский пр., д. 74/1, оф. 147

Тел.: (812) 327 5098