

**ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**  
на диссертационную работу Ингачевой Анастасии Сергеевны  
«Модели и методы рентгеновской компьютерной томографии в  
полихроматическом режиме», представленную на соискание  
ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ».

### **Актуальность темы диссертационной работы**

Развитие техники и создание новых технологий расширяет границы применимости метода компьютерной томографии. На сегодняшний день метод активно используется как в медицине, так и в промышленности, и в научных исследованиях. Первостепенным вопросом остается качество получаемых изображений, которое далеко не всегда удовлетворяет конечного пользователя. Несмотря на значительные успехи в области развития метода, существует большое количество источников возникновения искажений на реконструированном изображении, подавить которые эффективно не удается. Диссертационная работа Ингачевой А.С. посвящена вопросам разработки новых методов повышения качества результатов томографической реконструкции по данным, полученным на томографах с полихроматическим источником рентгеновского излучения. Использование полихроматического излучения является одним из источников искажений, возникающих на реконструированных изображениях, поэтому тема диссертационной работы актуальна.

## **Характеристика содержания работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертационной работы составляет 144 страницы, включая 44 рисунка и 5 таблиц. Список литературы включает 128 источников.

Во введении приводятся оценка актуальности диссертационной работы, формулировка цели исследования и задач, которые требуется решить для достижения этой цели.

В первой главе дана постановка классической задачи томографии, в которой используется предположение о монохроматичности зондирующего излучения. Описаны основные узлы томографа с лабораторным источником рентгеновского излучения. Рассмотрены причины, по которым модель формирования проекции, используемую в задаче томографии в классической постановке, некорректно использовать для работы с данными, полученными на томографах без использования монохроматора. Рассмотрены виды искажений, которые возникают на реконструированных изображениях из-за использования полихроматического рентгеновского излучения. Приведен обзор актуального состояния мировых исследований в данной области. Показаны преимущества и недостатки существующих подходов, обоснована необходимость разработки нового метода томографической реконструкции.

Во второй главе исследована спектральная модель оптического тракта рентгеновского томографа, показано, что рассмотренная модель описывает отклик томографа точнее, чем любая монохроматическая. Введены понятия монохроматических и полихроматических лучевых интегралов, доказаны свойства последних. Во второй главе установлена связь между полихроматическими и монохроматическими лучевыми интегралами через функцию коррекции. Показано, что в качестве функции коррекции может быть использован класс степенных функций. Проведено сравнительное исследование

функций коррекции, выраженных предложенным классом степенных функций и полиномами второй и третьей степени, которые на данный момент активно используются в мире.

В третьей главе соискатель описывает разработанный метод количественной оценки чашевидных артефактов, исследует свойства разработанного алгоритма, проводит сравнение результатов работы алгоритма с результатами работы ранее опубликованных методов.

В четвертой главе А.С. Ингачевой описан метод реконструкции данных, зарегистрированных с использованием полихроматического рентгеновского излучения. Метод заключается в обработке зарегистрированных данных с помощью корректирующей функции перед применением классического алгоритма томографической реконструкции. Описывается оригинальный алгоритм автоматического поиска параметра функции коррекции, основанный на свойстве инвариантности интеграла преобразования Радона. Методом численного моделирования исследованы границы применимости разработанного метода.

Пятая глава посвящена описанию разработанного комплекса программ, содержащего программную реализацию предложенных в диссертационной работе методов и алгоритмов. В главе показано применение разработанного комплекса, как для получения синтетических томографических данных в полихроматическом режиме, так и для обработки реальных экспериментальных данных.

В заключении представлены основные результаты, полученные в ходе диссертационного исследования.

Каждая глава диссертационной работы содержит четкие выводы, подтверждающие оригинальность и новизну полученных результатов, и их практическую значимость.

### **Достоверность и научная новизна основных положений и результатов работы**

Научной новизной обладают следующие полученные соискателем результаты:

1. описание отклика рентгеновского томографа на основе спектральной модели оптического тракта томографа с полихроматическим зондированием;
2. доказанная теорема, утверждающая, что функции, описывающие лучевые полихроматические интегралы, – положительные, выпуклые вверх, неубывающие;
3. метод количественной оценки выраженности чашевидных артефактов, не зависящий от числа и яркости объектов;
4. алгоритм автоматического определения параметра корректирующей функции, который не требует никакой априорной информации как о составе образца, так и спектре излучения.

Достоверность сформулированных в диссертации положений и выводов подтверждается тем, что они опираются на классический аппарат математики и физики, результатами проведенных измерений, представленными в диссертационной работе, а также совпадением результатов работы программного комплекса, который применялся для реконструкции экспериментальных томографических данных с используемыми для моделирования фантомами.

## **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**

Все основные положения, выносимые на защиту, являются в достаточной степени обоснованными. Разработанные методы и алгоритмы детально описаны, а достоверность выводов подтверждается численными сравнениями предложенных методов и алгоритмов с известными и ранее опубликованными. Существенная часть экспериментальных исследований производилась с использованием синтетических данных, которые можно получить с помощью свободно распространяемого программного обеспечения. Часть исследований проводилась на экспериментальных данных, находящихся в открытом доступе. Тем самым представленные результаты являются воспроизводимыми, верифицируемыми и убедительно показывают корректность основных результатов и выводов диссертации. Основные положения и результаты диссертационной работы прошли апробацию на профильных международных и российских конференциях.

## **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость диссертации Ингачевой А.С. заключается в развитии методов и алгоритмов рентгеновской компьютерной томографии. Соискателем разработан новый класс корректирующих функций, применение которых к полихроматическим лучевым интегралам позволяет повысить качество получаемых реконструированных изображений. Ингачева А.С. в диссертационной работе предложила метод автоматического поиска параметра модели при неизвестной априорной информации как о спектре зондирующего рентгеновского излучения, так и о составе образца. Таким образом, разработанный метод реконструкции по данным, полученным при

зондировании полихроматическим излучением, позволяет повысить точность реконструкции в отсутствие какой-либо априорной информации.

Представленные в диссертационной работе методы и алгоритмы реализованы соискателем в виде программного комплекса, позволяющего проводить вычислительные эксперименты по рентгеновской томографии в полихроматическом режиме, обрабатывать данные, полученные в реальных экспериментах, и получать результат томографической реконструкции более высокого качества по сравнению с реконструкцией классическими алгоритмами.

### **Публикация основных результатов диссертации**

Основное содержание диссертационной работы представлено в 11 печатных работах, 5 из них изданы в журналах, рекомендованных ВАК для опубликования результатов диссертации, 3 – в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus, 3 – в сборниках трудов конференций. Также получено свидетельство о регистрации программы для электронных вычислительных машин (ЭВМ).

Опубликованные работы и автореферат полностью отражают содержание диссертации.

### **Замечания**

Диссертационная работа Ингачевой А.С. в полной мере отражает решение поставленных задач и подтверждает достижение сформулированной цели. Однако по работе имеется несколько замечаний.

1. Наличие опечаток и неточностей в описании классических результатов компьютерной томографии – см. стр.17-20. Произвольное изменение обозначений одного и того же параметра модели (в обозначении  $R(\alpha,s)$  аргумент  $\alpha$  в формуле (1.13) переместился в индекс, на стр. 72 показатель количественной оценки чашевидных дефектов обозначен *сe*, в далее - *CE*).
2. Неудачно выбрано представление результатов аппроксимации полихроматического лучевого интеграла степенной функцией – ни в подписи под рисунком 2.8, ни в тексте диссертации не даны четкие пояснения того, что же изображено на рисунке 2.8,б.
3. Было бы полезно в самом начале описания метода коррекции сказать, что строгое обоснование метода дано для однородных образцов.

### **Общая оценка работы**

Перечисленные недостатки и замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы Ингачевой А.С., ее научную ценность и практическую значимость. Диссертационная работа Ингачевой А.С. является законченной научно-квалификационной работой, отвечающей критериям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (с изменениями постановлений Правительства РФ от 30.07.2014 г. № 723, от 21.04.2016 г. № 335, от 02.08.2016 г. № 748, от 29.05.2017 г. № 650, от 28.08.2017 г. № 1024, от 01.10.2018 г. № 1168), предъявляемым к кандидатским диссертациям на соискание ученых степеней.

Считаю, что Ингачева Анастасия Сергеевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент:

заведующий кафедрой математического моделирования и информатики физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, доктор физико-математических наук (специальность 05.13.18 – «математическое моделирование, численные методы и комплексы программы»), профессор Чуличков Алексей Иванович / 

«08» декабря 2020 г

Подпись Чуличкова А.И. заверяю

Декан физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова  
профессор

 Н.Н.Сысоев

Сведения об организации:



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

Адрес: 119991, РФ, Москва, Ленинские горы, д. 1.

Телефон: +7 495 939-16-82

Факс: +7 495 932-88-20

E-mail: [info@physics.msu.ru](mailto:info@physics.msu.ru)