

На правах рукописи



Черепенников Юрий Михайлович

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА РЕНТГЕНОВСКОГО АБСОРБЦИОННОГО
КОНТРОЛЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СРЕД, ОСНОВАННЫЕ НА
МОНОХРОМАТИЗАЦИИ ЗОНДИРУЮЩЕГО ПУЧКА ГЕНЕРИРУЮЩЕГО
ИСТОЧНИКА**

**05.11.13 – Приборы и методы контроля природной
среды, веществ, материалов и изделий**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Томск – 2016

Работа выполнена на кафедре прикладной физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Потылицын Александр Петрович

Официальные оппоненты: **Воробьев Александр Павлович**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение Государственный научный центр Российской Федерации Институт физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт», главный научный сотрудник Отдела экспериментальной физики

Ефимов Валерий Григорьевич, кандидат технических наук, доктор физико-математических наук, Акционерное общество «Федеральный научно-производственный центр «Алтай», ведущий научный сотрудник лаборатории акустических и радиационных методов контроля

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»

Защита состоится «27» декабря 2016 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 212.269.09 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>

Автореферат разослан «___» _____ 2016 года

Ученый секретарь диссертационного совета
канд. техн. наук



Васендина Е.А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Повышение эффективности лабораторных исследований и промышленного производства в таких ведущих отраслях народного хозяйства, как атомная энергетика, нефтегазовая, горнодобывающая, металлургическая, химическая промышленность и ряд других во многом зависит от совершенствования технологических процессов. Оптимизация технологических процессов в свою очередь определяется качеством и эффективностью аналитической техники, в том числе и лабораторной. Многие задачи технологического контроля могут быть решены с помощью экспрессных и высокопроизводительных методов лабораторного анализа отобранных технологических образцов. При этом требования к чувствительности и точности таких анализов постоянно растут. Кроме того, широкий ряд задач требует контроля на производстве, непосредственно в ходе технологического процесса. Также стоит отметить, что с ходом технологического прогресса требования к точности такого контроля повышаются до уровней, еще недавно предъявляемых к лабораторным исследованиям.

Отдельно стоит задача элементного анализа сверхчистых элементов, которая сопряжена с рядом подзадач по обеспечению сохранности первичного состава проб на стадиях пробоподготовки и исследования.

Большими потенциальными возможностями для решения обозначенных проблем обладают ядерно-физические методы анализа и особенно методы, основанные на применении рентгеновского излучения (РИ), которые обладают экспрессностью, универсальностью и возможностью автоматизации основных аналитических операций.

Спектр рентгеновских исследований, используемых сейчас в различных областях науки, промышленности и медицины, необычайно широк. Несмотря на все разнообразие методик, используемых в анализе с применением пучков РИ, любое рентгеновское исследование можно разбить на три этапа: генерация пучка РИ, его формирование и зондирование объекта исследования; регистрация излучения, провзаимодействовавшего с объектом исследования, и несущего в себе информацию об объекте; обработка информации. Стоит отметить, что для получения качественных данных о строении объекта, необходимо постоянно улучшать характеристики аппаратуры на всех трех этапах.

Повышение эффективности и чувствительности рентгеновских исследований может достигаться за счет внедрения более совершенных методов облучения объекта исследования и разработки источников РИ с необходимыми для такого внедрения характеристиками зондирующего пучка, в частности, перехода к использованию для пучков монохроматического РИ (МРИ) или квазимонохроматического РИ [1-3].

Отдельную группу рентгеновских исследований, интересную с точки зрения данной работы, представляют собой методы, которые по измерениям коэффициентов поглощения излучения при нескольких различных энергиях позволяют оценить ряд характеристик исследуемого объекта. При этом наиболее широкое распространение получили так называемые «дуальные» методы, в которых анализ проводится по двум измерениям. Подобные методы получили распространение в целом ряде прикладных задач, в частности, в компонентном

анализе потоков многофазной жидкости [4, 5], где требуются высокоинтенсивные пучки РИ с линейчатым или перестраиваемым монохроматическим спектром.

Несмотря на растущий интерес к использованию пучков МРИ в различных областях науки, их применение в настоящее время сталкивается с существенными ограничениями. Главным препятствием к более активному внедрению методов, основанных на применении МРИ является тот факт, что при монохроматизации первичного пучка РИ стандартными методами интенсивность итогового зондирующего пучка оказывается существенно снижена, что ведет к значительному увеличению времени рентгеновского исследования, уменьшению эффективности использования зондирующего пучка, а, зачастую, и к полной невозможности проведения многих исследований на стандартных лабораторных генерирующих источниках.

Одним из путей повышения интенсивности пучков монохроматического РИ является использование адаптивной рентгеновской оптики в виде монохроматоров с инициированной в них сверхрешеткой. Такие монохроматоры представляют собой стандартные кристаллические монохроматоры с накладываемыми на них разнообразными внешними воздействиями, например электромагнитным воздействием, возбуждающим в пьезокристалле поле акустических волн [6]. Использование подобных элементов позволяет увеличить светимость монохроматических источников РИ основанных на дифракции, осуществлять управление и транспортировку пучков РИ с минимальными потерями. Кроме того, при контролируемом внешнем воздействии, появляется возможность управления во времени и в пространстве интенсивностью отраженного пучка.

Таким образом, исследования и разработка технологий для создания источников монохроматического РИ повышенной интенсивности, на основе стандартных лабораторных генерирующих источников и адаптивной рентгеновской оптики и являются важными и актуальными.

Цель и задачи работы

Целью данной работы является разработка методов повышения чувствительности рентгеновского абсорбционного анализа для контроля многокомпонентных сред и устройств для их реализации на основе современных устройств рентгеновской оптики.

В соответствии с общей целью работы в диссертации решаются следующие основные задачи:

1. разработка программного кода для расчета спектральных характеристик рентгеновского излучения, генерируемого электронным пучком в аморфных мишенях;
2. проведение численного моделирования характеристик источника рентгеновского излучения с учетом конкретных условий эксперимента;
3. экспериментальные исследования возможности увеличения интенсивности монохроматического рентгеновского излучения в случае использования адаптивной рентгеновской оптики;
4. разработка устройства для рентгеновского абсорбционного элементного анализа на основе волнодисперсионной схемы;
5. разработка устройства для контроля компонентного состава многофазной жидкости
6. определение чувствительности предложенных устройств

Научная новизна

1. Разработано устройство для элементного абсорбционного анализа на базе лабораторного источника рентгеновского излучения с использованием адаптивной рентгеновской оптики, позволяющее определять в составе пробы наличие примесей химических элементов в диапазоне элементов от Са до Рb, с концентрацией до 10^{-4} за время измерения 3 часа.
2. Разработано устройство для контроля состава многофазной жидкости, обеспечивающее определение компонент смеси с концентрацией до 0,1% за время одиночного измерения 1 секунда.
3. Исследованы частотные и амплитудные зависимости интенсивности дифрагированного рентгеновского излучения в присутствии электромагнитного возбуждения кристалла и показана возможность увеличения интенсивности излучения в несколько раз при использовании адаптивной рентгеновской оптики.
4. Рассчитаны показатели контраста и соотношение сигнал/шум с учетом условий конкретного эксперимента для случаев использования монохроматического рентгеновского излучения и излучения с непрерывным спектром, на основании которых показаны преимущества применения монохроматического рентгеновского излучения.

Научная и практическая ценность

Реализован программный код, выполненный с использованием инструментария GEANT4, для численного моделирования спектральных характеристик рентгеновского излучения, генерируемого различными источниками для произвольной геометрии. Разработанный код позволяет рассчитывать спектральные характеристики генерирующих источников излучения. Одна из опций кода позволяет моделировать результаты взаимодействия зондирующего пучка с веществом.

Реализовано устройство адаптивной рентгеновской оптики (акустомонохроматор) на основе кристалла кварца, находящегося под внешним электромагнитным воздействием, позволяющего получать пучки монохроматического рентгеновского излучения с увеличенной интенсивностью в 5 раз по сравнению с традиционными монохроматорами.

Разработаны и запатентованы два устройства: для рентгеновского абсорбционного элементного анализа, обеспечивающее порог определения концентраций примесей не хуже 10^{-4} по массе в широком диапазоне химических элементов от Са до Рb; и для контроля компонентного состава многокомпонентных жидкостей в потоке, обеспечивающего чувствительность не хуже 0,1% за время единичного измерения равное одной секунде.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Устройство для элементного абсорбционного анализа с использованием адаптивной рентгеновской оптики, обеспечивающее чувствительность не хуже 10^{-4} .
2. Устройство для контроля компонентного состава многофазной жидкости с чувствительностью не хуже 0,1 % при времени измерения 1 секунда.
3. Программный код для численного моделирования источника рентгеновского излучения с учетом конкретных условий эксперимента.

4. Результаты экспериментальных исследований акустомонохроматора, доказывающие возможность управления интенсивностью дифрагированного пучка излучения путем варьирования амплитуды и частоты внешнего электромагнитного сигнала, а также возможность увеличения интенсивности дифрагированного пучка в несколько раз по сравнению с традиционными монохроматорами.

Достоверность и обоснованность результатов

Достоверность и обоснованность результатов работы обеспечиваются систематическим характером исследований, использованием откалиброванной и поверенной измерительной аппаратуры и детекторных систем, использованием различных экспериментальных методик, использованием для моделирования признанного инструментария GEANT4.

Апробация

Результаты диссертации докладывались на следующих мероприятиях:

1. XVII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», Томск, 2011;
2. Всероссийский конкурс научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области физических наук в рамках Всероссийского фестиваля науки, Томск, 2011;
3. IX International Symposium Radiation from relativistic electrons in periodic structures (RREPS-11), Egham, Great Britain, 2011;
4. XVIII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», Томск, 2012;
5. Всероссийский конкурс научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области физических наук, Москва, 2012;
6. 51-я Международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс», Новосибирск, 2013
7. 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST – 2012), Tomsk, 2012;
8. X International Symposium Radiation from relativistic electrons in periodic structures (RREPS-13), Erevan, Armenia, 2013
9. IV Международная школа-конференция молодых атомщиков Сибири, Томск, 2013
10. 6th International Conference Charged and neutral particles channeling phenomena, Capri, Italy, 2014;
11. VI Международная научно-практическая конференция «Физико-технические проблемы атомной науки, энергетики и промышленности», Томск, 2014;
12. IV международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий», Москва, 2015
13. XI International Symposium Radiation from relativistic electrons in periodic structures (RREPS-15), Saint Petersburg, 2015;
14. Российская школа-конференция с международным участием «Информационные технологии неразрушающего контроля», Томск, 2015;
15. VI Школа-конференция молодых атомщиков Сибири, Томск, 2015;
16. RACIRI Summer School 2016: Convergent Science and Technology for Society, Repino, 2016.

Личный вклад

Личный вклад автора состоит в разработке программного кода для численного моделирования, создании экспериментальных стендов, выборе методов экспериментальных исследований, проведении экспериментальных и численных исследований, анализе их результатов, подготовке публикаций и заявок на патенты. Представленные в диссертации результаты получены автором лично. Автором самостоятельно выдвинуты все защищаемые научные положения. Вклад соавторов в основные публикации не превышал 40% от общего объема работы.

Связь диссертационных исследований с научно-техническими программами и грантами.

Часть результатов представленных в работе была использована при выполнении грантов и государственных контрактов:

- ФЦП ГК № П1202 «Акустооптические элементы для медицинского диагностического оборудования» (2009 – 2011 гг.);
- ФЦП ГК № 11.519.11.2030 «Разработка адаптивной рентгеновской оптики нового поколения для устройств исследования биологических объектов и быстропротекающих процессов» (2011 – 2013 гг.);
- ФЦП ГК № 14.515.11.0102 «Разработка аппаратно-программных средств бесконтактного, высокоточного мониторинга компонентного состава потока скважинной жидкости для интеллектуальных систем управления разработки месторождений углеводородов» (2013 г.)
- Грант Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, договор № 91гу1/2013 «Разработка аппаратно-программного комплекса бесконтактного высокоточного мониторинга потока многокомпонентной жидкости» (2013 – 2016 гг.)
- Грант компании British Petroleum на научные исследования по теме «Технология бессепарационного экспресс определения характеристик потоков многофазной жидкости и устройство для ее реализации» (2015-2016 гг.)

Последние два гранта выполнены непосредственно под руководством автора диссертации.

Публикации

По теме диссертации опубликована 31 работа, из которых 4 статей в изданиях, включенных в списки ВАК, 5 статей индексируются базами Web of Science и SciVerse Scopus (в т.ч. 1 с импакт-фактором больше 1), а также 15 материалов и тезисов докладов на мероприятиях всероссийского и международного уровней.

В рамках выполнения работы получены три патента: один патент на изобретение, два патента на полезную модель, а также одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, шести приложений и списка цитируемой литературы, содержащего 103 библиографические ссылки. Общий объем диссертации составляет 156 страницы и включает 47 рисунков и 5 таблиц.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, проводится обзор научных областей, в которых востребовано применение пучков

монохроматического излучения, рассмотрены методы получения пучков монохроматического и квазимонохроматического излучения, а также обзор работ, посвященных дифракции рентгеновского излучения в кристаллах с инициированной внешними воздействиями сверхрешеткой. Описана структура диссертации и сформулированы основные задачи, решаемые в ней.

В первой главе описан программный код, выполненный с использованием инструментария GEANT4, для численного моделирования спектральных характеристик РИ. С использованием разработанного кода проведен расчет типовых спектров генерирующих источников на базе рентгеновских трубок. Для типового рентгеновского абсорбционного исследования рассчитаны такие параметры как контраст, и сигнал/шум, а также поглощенной дозы излучения в исследуемом объекте, на основании чего показано преимущество использования МРИ.

Расчет типовых спектров проводился на примере мишени, выполненной из серебра толщиной 5 мм и поперечными размерами 2×2 мм², на которую падает пучок электронов с энергией 60 кэВ, генерирующий в ней поток РИ. Детектор с поперечными размерами 5×5 см² установлен на расстоянии 10 см. Воздух из рассматриваемой области откачан. Задача состоит в моделировании спектрального распределения фотонов РИ. Расчет проведен для двух основных схем исполнения рентгеновских трубок с массивным анодом, представленных на рисунке 1. Рассчитанные спектры приведены на рисунке 2. В ходе моделирования наблюдалась статистика $N=10^8$ историй, что потребовало время расчета 4 часа на одном вычислительном ядре суперкомпьютера ТПУ СКИФ-2 (тактовая частота 2,9 ГГц)

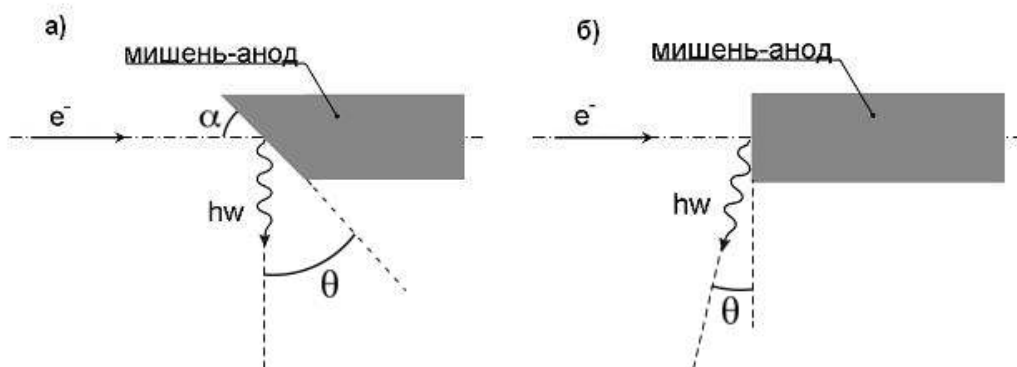
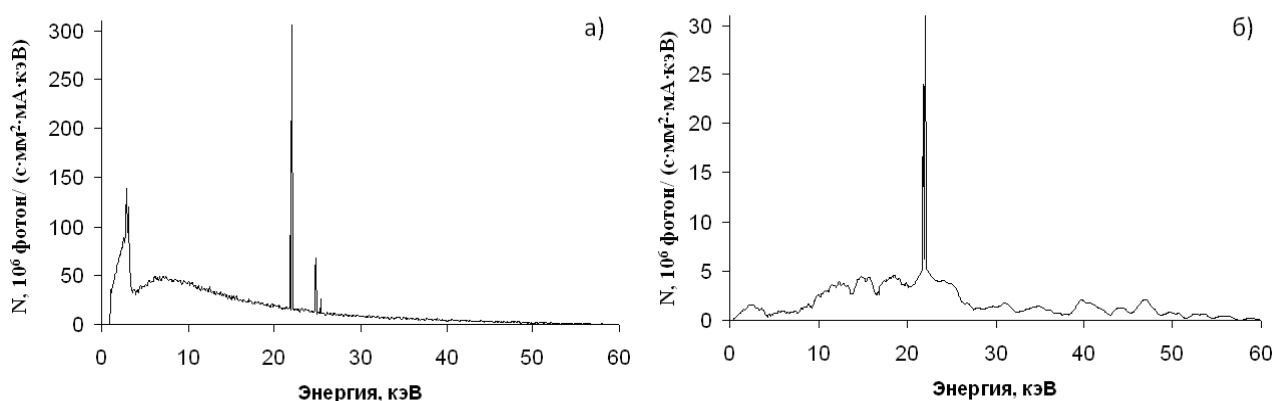


Рисунок 1 – Схема моделируемого эксперимента по генерации РИ в аморфной мишени пучком электронов



а) угол $\alpha=45$ градусов, угол $\theta=45$ градусов; б) угол $\theta=6$ градусов.

Рисунок 2 – Спектры РИ при различных вариантах исполнения РТ

На основании результатов моделирования, представленных на рисунке 2, сделан вывод, что при варианте исполнения трубки с перпендикулярным падением пучка на мишень (рисунок 2,б) уровень интенсивности излучения в среднем для

всех энергий приблизительно на порядок ниже, чем при варианте исполнения с наклонной мишенью. Наличие значительных флуктуаций в спектре, представленном на рисунке 2,б, объясняется тем, что в силу меньшей относительной интенсивности выхода РИ, при одном и том же количестве разыгранных при моделировании историй количество зарегистрированных квантов будет так же отличаться в 10 раз для двух рассмотренных вариантов, а уменьшение числа фотонов N в 10 раз, согласно формуле, ведет к увеличению относительной ошибки в $\sqrt{10} = 3,62$ раза. Наличием этих флуктуаций, в свою очередь, объясняется то, что в спектре на рисунке 2,б не наблюдается K_{β} -линия ХРИ серебра. Для данной геометрии «статистика» оказывается недостаточно высока, чтобы распознать K_{β} -линию на фоне флуктуаций. Таким образом, в дальнейшем при моделировании рассматривался вариант с наклонным падением пучка на мишень, обеспечивающий большую интенсивность излучения. Далее проведено моделирование спектра источника рентгеновского излучения с учетом поглощения излучения в выходном окне источника, а также рассмотрен вопрос о влиянии варьирования в геометрии углов α и θ (рисунок 1,а) на выход излучения. Таким образом, разработанный программный код позволяет моделировать генерирующие источники рентгеновского излучения свободно задавая геометрические параметры и материал мишени. При дальнейшем моделировании источников на базе рентгеновских трубок рассматривалась геометрия с наклонным падением пучка под углом $\alpha = 45$ градусов и выводом РИ также под углом $\theta = 45$ градусов.

Далее в главе на примере типового рентгеновского абсорбционного исследования (схема приведена на рисунке 3) проводится расчет характеристик контраста и соотношения сигнал/шум в канале детектора. Расчет проведен для случаев применения монохроматического пучка и пучка с непрерывным спектром (рисунок 4), генерируемого рентгеновской трубкой с W анодом при ускоряющем напряжении 120 кВ с использованием алюминиевого фильтра толщиной 2 мм, промоделированного с использованием разработанного программного кода.

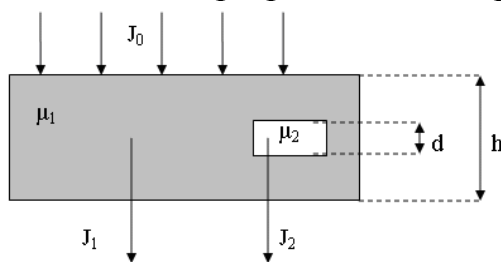


Рисунок 3 – Распределение интенсивностей излучения для модельного эксперимента

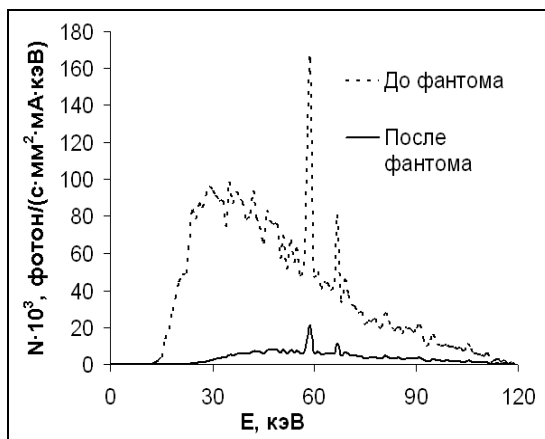


Рисунок 4 – Спектр рентгеновской трубки до и после прохождения излучения через фантом

Контраст изображения, полученного в таком модельном эксперименте для непрерывного спектра и для пучка МРИ с энергией 30 кэВ рассчитывался по формуле:

$$K = \frac{J_2 - J_1}{J_1} = \frac{\int_0^{E_{\max}} N_2(E) \cdot E dE - \int_0^{E_{\max}} N_1(E) \cdot E dE}{\int_0^{E_{\max}} N_1(E) \cdot E dE} \quad (1)$$

где J_1 – интегральная интенсивность излучения за однородным участком объекта, J_2 – интегральная интенсивность излучения за участком объекта, содержащим исследуемую деталь, $N_1(E)$ – спектральная плотность потока квантов за однородным участком объекта, $N_2(E)$ – спектральная плотность потока квантов за участком объекта, содержащим исследуемую деталь.

Рассчитанные таким образом значение K составили $\approx 0,0208$, что соответствует 2,08 процента для случая сплошного спектра и $\approx 0,0365$ что соответствует 3,65 процента для случая монолинии.

Из анализа формулы (1) следует, что контраст изображения, вообще говоря, является скорее характеристикой эксперимента, а не готового изображения. В частности, выражение никак не зависит от количества квантов РИ, упавших на объект, поскольку интенсивности J_1 и J_2 растут пропорционально. Контраст изображения связан с соотношением сигнал/шум на выходе из исследуемого объекта, и именно это соотношение наиболее целесообразно использовать для оценки качества изображения, в случае применения цифровых детекторов. Соотношение сигнал/шум в канале детектора оценивалось по формуле:

$$SNR = \frac{\sum_E (N_2(E) - N_1(E))}{\sum_E \sqrt{N_1(E)}} \quad (2)$$

Рассчитанные значения соотношения сигнал/шум в канале детектора при наборе минимальной пороговой дозы, необходимой для формирования изображения, составили 1,43 для случая монохроматической линии энергии 30 кэВ и 0,57 для случая сплошного спектра. Следует отметить, что для случая монолинии значения SNR и K сильно зависят от энергии выбранной линии. Таким образом, для улучшения качества получаемых данных требуется выбирать оптимальную энергию квантов, для каждого конкретного типа исследований. В противном случае, качество может оказаться даже хуже. Так, для данного эксперимента, при использовании МРИ с энергией 60 кэВ значение сигнал/шум оказывается практически идентичным случаю использования рассмотренного сплошного спектра, а при энергии 90 кэВ – значительно меньшим. Результаты расчета соотношения сигнал/шум и контраста для всех описанных случаев приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение характеристик рентгеновского изображения

	Сплошной спектр	Монохроматическое РИ		
		Е=30 кэВ	Е=60 кэВ	Е=90 кэВ
Контраст (%)	2,08	3,65	2,06	1,77
Сигнал/шум	0,57	1,43	0,56	0,37

Во второй главе описан модуль для монохроматизации РИ на основе активного кварцевого элемента. Приведены результаты экспериментальных исследований дифракции РИ на таком монохроматоре. Исследованы частотные и амплитудные зависимости интенсивности дифрагированного рентгеновского излучения в присутствии электромагнитного возбуждения кристалла и показана возможность увеличения интенсивности излучения в 5 раз при использовании адаптивной рентгеновской оптики по сравнению с традиционными монохроматорами.

Принципиальная схема модуля монохроматизации рентгеновского излучения приведена на рисунке 5. Помимо непосредственно акустомонохроматора, представляющего собой кристаллический элемент вместе с держателем для установки в гониометре, и клеммами для подачи электрического сигнала на кристаллический элемент, в модуль так же входят генератор и усилитель электрических сигналов.

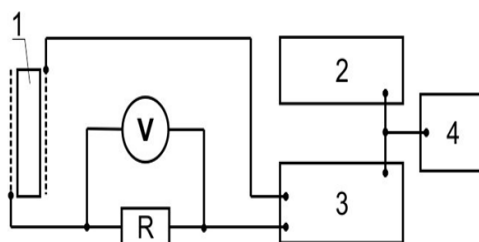


Рисунок 5 – Структурная схема акустомонохроматора: 1 – пьезокристалл; 2 – генератор; 3 – усилитель; 4 – осциллограф. Пунктиром изображены клеммы – плоские полированные металлические шайбы

Главный элемент блока монохроматизации – экспериментальный образец акустомонохроматора состоит из: кварцевого резонатора на основе кристаллической пластинки кварца Х-среза диаметром 15 мм и толщиной 0,3, 0,65, или 0,9 мм с напыленными на грани алюминиевыми электродами (магнетронное напыление); кристаллодержателя с системой регулировки, изготовленного из полипропилена; медных клемм; силиконовых прокладок. Принципиальная схема устройства акустомонохроматора приведена на рисунке 6.

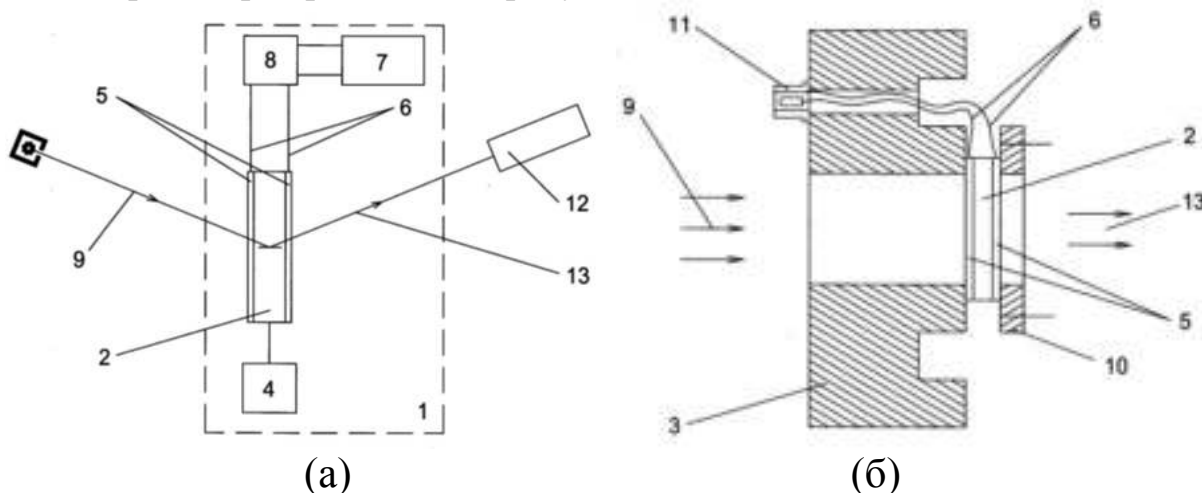


Рисунок 6 – Принципиальная схема устройства рентгеновского акустомонохроматора (а), устройство резонатора (б): 1 – акустомонохроматор; 2 – дифракционный элемент; 3 – держатель; 4 – средство ориентации акустомонохроматора; 5 – электропроводящий слой; 6 – провода; 7 – генератор; 8 – линейный усилитель; 9 – падающий рентгеновский пучок; 10 – крышка с мягкой фиксацией; 11 – разъем; 12 – детектор; 13 – монохроматизированный пучок рентгеновского излучения

Акустомонохроматор 1 (на рисунке 6 выделен пунктирной линией) содержит дифракционный элемент в виде пластины 2 монокристалла, держатель 3, средство 4 ориентации держателя. Рабочие поверхности пластины 2 монокристалла покрыты электропроводящими слоями 5 с выводными проводами 6. Монохроматор снабжен также генератором 7 сигналов сверхвысокой частоты и подключенным к нему линейным усилителем 8, к выходу которого подключены выводные провода 6. Пластина 2 выполнена из совершенного монокристалла кварца X-среза и ориентирована отражающими атомными плоскостями под углом Брэгга к падающему рентгеновскому пучку 9 в положении дифракции в геометрии Лауэ. Электропроводящие слои 5 выполнены из алюминия или серебра. Пластина 2 со слоями 5 установлена в держателе 3 и “мягко” зафиксирована крышкой 10. Для удобства эксплуатации держатель может быть снабжен электрическим разъемом 11 для подключения выводных проводов 6 к линейному усилителю 8. В качестве средства 4 ориентации держателя может служить любой стандартный гониометр, обеспечивающий точность в несколько угловых секунд.

Основной элемент акустомонохроматора – кристаллические пластинки кварца – были изготовлены ОАО «Морион» (199155, Санкт-Петербург, пр. КИМа 13А) в соответствии с разработанным техническим заданием.

Экспериментальные исследования проводились с использованием разработанного стенда. Схема эксперимента приведена на рисунке 7.

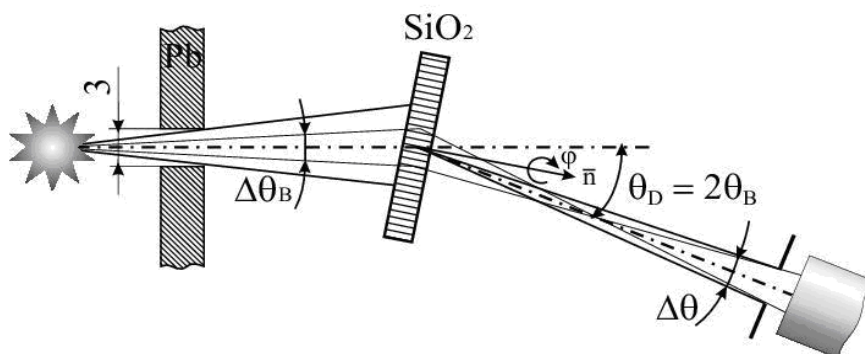


Рисунок 7 – Схема эксперимента: θ_B – угол Брэгга, θ_D – угол наблюдения

В качестве источника рентгеновского излучения использовался рентгеновский аппарат РАП 160-5. Измерения проводились при напряжении 48 кВ и токе 1 мА. Рентгеновский аппарат был помещен в свинцовый домик с толщиной стенки 5 см. Излучение формировалось коллиматором диаметром 3 мм, расположенным на расстоянии 90 мм от выходного окна рентгеновской трубки, после чего падало на кристалл кварца, установленный в дистанционно-управляемом гониометре, на расстоянии 215 мм от коллиматора. Дифрагированное на кристалле кварца излучение регистрировалось детектором в направлении под двойным углом Брэгга.

Проводились измерения частотной и амплитудной зависимостей интенсивности дифрагированного излучения для всех трех кристаллов. На рисунке 8 приведены зависимости интенсивности дифрагированного излучения от частоты переменного тока на примере кристалла толщиной 0,9 мм. Как видно из рисунка, существует резонансная частота, при которой интенсивность дифрагированного излучения максимальна. Значение этой частоты соответствует условию возникновения стоячей волны в кристалле и может быть рассчитано по формуле $f_n = \frac{nc_s}{2l}$, где n – нечётные

целые числа, l – толщина кристалла, c_s – скорость распространения ультразвуковой

волны в кварце порядка 5700 м/с. Однако вследствие несовершенства кристаллов и погрешности регистрирующей аппаратуры, следует проводить частотное сканирование в области теоретических резонансов для нахождения экспериментальных значений резонансных частот.

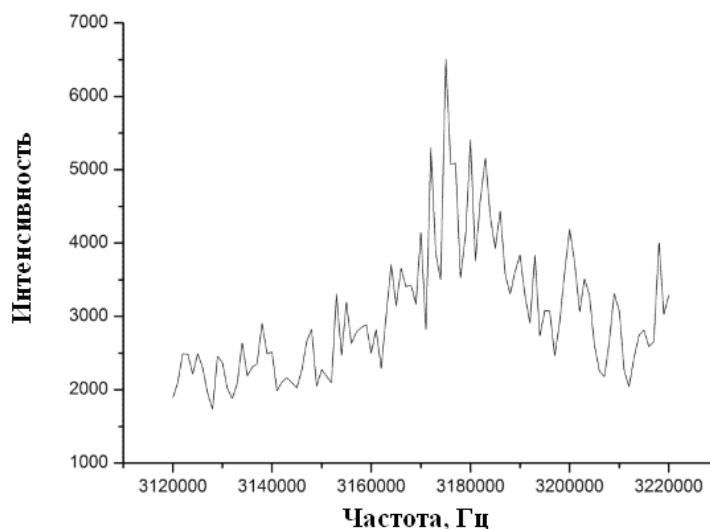


Рисунок 8 – Зависимость интенсивности дифрагированного излучения от частоты переменного тока на кристалле толщиной 0,9 мм

После нахождения частотных зависимостей, были проведены эксперименты по выявлению зависимости интенсивности дифрагированного излучения от величины напряжения на кристалле. На рисунке 9 приведены такие зависимости для кристаллов толщиной 0,3 и 0,9 мм (а, б). Анализируя указанные графики, можно заметить, что начальные участки кривых интенсивности имеют линейные участки. Длина линейного участка зависит от толщины. Так, из рисунка 9 видно, что для кристалла толщиной 0,9 мм линейный участок длится до напряжения 40 В, а для кристалла толщиной 300 мкм только до 12,5 В. Объясняется это тем, что от толщины кристалла зависит его сопротивление и при больших напряжениях возникает «утечка» зарядов.

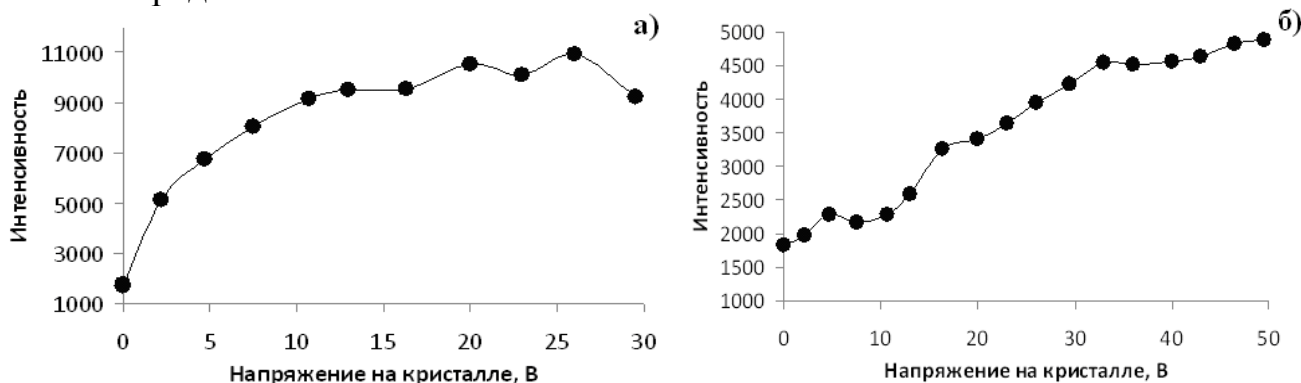


Рисунок 9 – Зависимости интенсивности дифрагированного излучения от приложенного напряжения на кристаллы толщиной 0,3 (а) и 0,9 (б) мм.

Следующим этапом исследований было проведение спектрального анализа дифрагированного излучения, с использованием полупроводникового детектора БДЕР-КИ-11К. При регистрации диффрагированного излучения время набора сигнала (время экспозиции) для всех спектров составляло 200 с. В качестве сравнения для каждого кристалла были сняты спектры с подачей переменного тока при заданной резонансной частоте на кристалл и без него. Спектры для кристаллов толщиной 0,3 и 0,9 мм приведены на рисунке 10. Как видно из рисунка,

увеличение интенсивности в эксперименте достигало пяти раз в случае электромагнитного воздействия на кристалл.

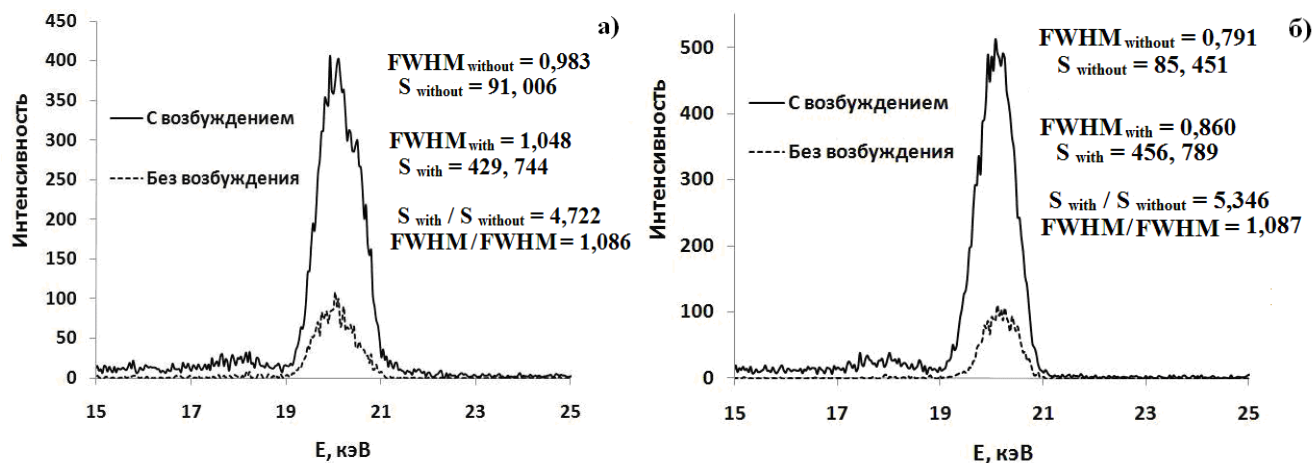


Рисунок 10 – Сравнения спектров дифрагированного излучения на кристаллах кварца толщиной 0,9 (а) и 0,3 (б) мм.

Таким образом, проведенные эксперименты показали эффективность применения для монохроматизации пучков РИ адаптивных элементов рентгеновской оптики. Применение подобных элементов адаптивной рентгеновской оптики позволяет увеличить интенсивность монохроматизированных пучков РИ и обеспечивать управление характеристиками пучков, например, изменяя амплитуду и или частоту внешнего электромагнитного воздействия.

В третьей главе предложено устройство для рентгеновского абсорбционного анализа на основе разработанного акустического монохроматора. Методом численного моделирования на основе разработанного в первой главе программного кода оценена чувствительность предложенного устройства для элементного абсорбционного анализа, которая составила не менее 10^{-4} по массе. Описано устройство для контроля компонентного состава многокомпонентных сред, обеспечивающее определение компонент смеси с концентрацией до 0,1% за время одиночного измерения 1 секунда.

На рисунке 11 приведена функциональная схема предложенного устройства для абсорбционного элементного анализа. Устройство для рентгеновского абсорбционного спектрального анализа содержит расположенные на одной оптической оси источник рентгеновского излучения 1 (ИИ) на основе рентгеновской трубки, двухщелевой коллиматор 2 (ЩК), акустомонохроматор 3 (АМ), установленный на держателе гониометрической приставки 4 (ГП) и поглотитель 5, установленный на основании гониометрической приставки. За акустомонохроматором по направлению дифракции на втором держателе гониометрической приставки установлен объект исследования 6 и блок детектирования 7 (БД). Держатели механически связаны с двигателями гониометрической приставки. Акустомонохроматор через усилитель электрического сигнала 8 (УС) подключен к широкополосному генератору электромагнитных колебаний 9 (ШГ). Источник рентгеновского излучения, двигатели гониометрической приставки, широкополосный генератор электромагнитных колебаний и блок детектирования подключены к компьютеру 10 (ПК) через соответствующие драйверы управления. С помощью шаговых двигателей гониометрической приставки одновременно поворачивают держатель с установленным на нем акустомонохроматором и держатель с установленными на нем объектом исследования и блоком детектирования, при этом энергия излучения,

которое проходит через объект исследования, меняется в соответствии с законом Брэгга. При этом блок детектирования записывает спектрометрическую информацию, получение которой и является главной задачей.

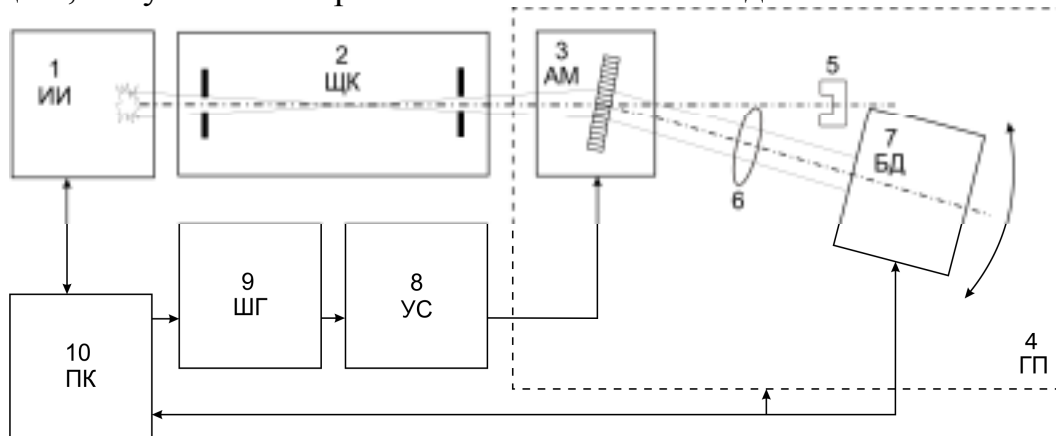


Рисунок 11 – Функциональная схема устройства для абсорбционного элементного анализа

Количественные оценки чувствительности проводились с использованием разработанного программного кода, по следующему алгоритму. На исследуемый объект (пробу) падает пучок РИ с энергиями квантов, лежащими в области K -края поглощения Cr . Детектор с поперечными размерами 2×2 мм установленный на оси пучка РИ на расстоянии 20 мм от пробы регистрировал все прошедшие фотоны с разделением по энергиям. Проводилось моделирование спектров РИ прошедшего через пробу при разных концентрациях примеси и последующее их сравнение между собой и чистой пробой. По результатам моделирования было установлено, что при статистике 10^9 фотонов на канал концентрация Cr 10^{-4} по массе хорошо различима в пробе, в то время как 10^{-5} уже не видна. Также было проведено моделирование для пробы, представляющей собой водную матрицу с примесями химических элементов из разных областей периодической таблицы той же концентрации: Ca (как легкий элемент), Fe (средний по тяжести) и Pb (тяжелый). На рисунке 12 приведены разностные спектры поглощения (разность спектров поглощения водной пробы без примеси, и водной пробы, содержащей примесь) для таких проб. В спектрах хорошо различим скачок интенсивности при переходе через край поглощения.

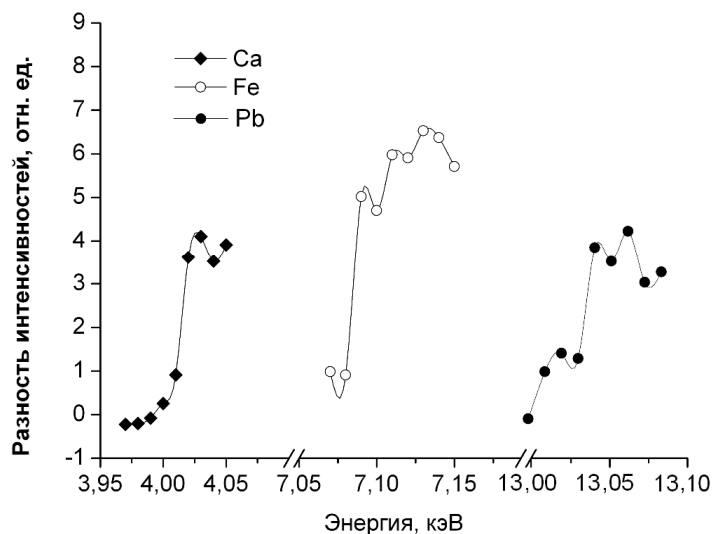


Рисунок 12 – Разностные спектры для пробы воды с примесями Ca , Fe , Pb . Статистика – 10^9 первоначальных фотонов на канал

Таким образом, было показано, что предложенный способ обеспечивает чувствительность 10^{-4} по массе для широкого спектра примесей – от Са до Рb. Согласно проведенным далее оценкам, полный элементный анализ пробы по химическим элементам в диапазоне от Са до Рb можно провести за время равное трем часам, при использовании акустомонохроматора и стандартного генерирующего источника на основе рентгеновской трубки.

Также предложено устройство для контроля компонентного состава многокомпонентных сред, функциональная схема приведена на рисунке 13.

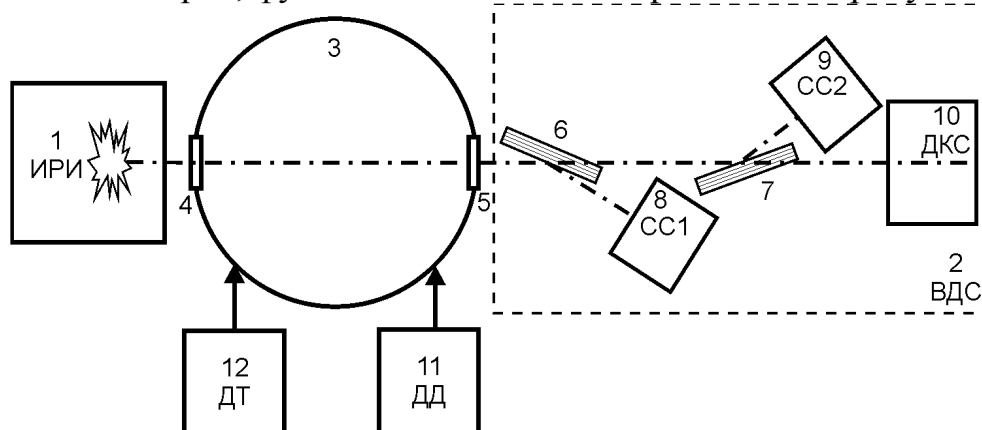


Рисунок 13 – Разностные спектры для пробы воды с примесями Са, Fe, Рb. Статистика – 10^9 первоначальных фотонов на канал

Источник рентгеновского излучения 1 генерирует излучение со сложным спектральным составом, которое направлено на трубу 3, заполненную многокомпонентной смесью. Одна часть рентгеновского излучения проходит через окна 4 и 5 из материала с низким коэффициентом поглощения излучения и смесь, другая часть – через стенки трубы 3, в которых излучение практически полностью поглощается, тем самым формируется узкий луч излучения. Луч, прошедший через многокомпонентную смесь, становится носителем информации о ее характеристиках, так как в зависимости от состава и параметров многофазной жидкости рентгеновское излучение по-разному поглощается и рассеивается за счет фотоэффекта и комптоновского рассеяния. Прошедшая без взаимодействия с окнами 4 и 5 и потоком многофазной жидкости часть луча рентгеновского излучения, направляется на волнодисперсионный спектрометр 2, где луч попадает на кристаллический монохроматор-анализатор 6. Часть луча рентгеновского излучения, удовлетворяющая условию Брэгга, дифрагирует на кристаллическом монохроматоре-анализаторе 6, а другая часть проходит его без отклонения. После этого, луч попадает на кристаллический монохроматор-анализатор 7, где, аналогично, часть луча, удовлетворяющая условию Брэгга для кристаллического монохроматора-анализатора 7, дифрагирует, а оставшаяся часть проходит его без отклонения.

Дифрагированное на кристаллическом монохроматоре-анализаторе 6 излучение направляется в счетчик ионизирующего излучения 8, а дифрагированное на кристаллическом монохроматоре-анализаторе 7 излучение направляется в счетчик ионизирующего излучения 9. При этом дифрагированное излучение уже является монохроматическим. Сцинтилляционный счетчик ионизирующего излучения 8 регистрирует монохроматическое излучение с одной энергией, соответствующей условию Брэгга для кристаллического монохроматора-анализатора 6, и регистрирует скорость счета в одном спектральном диапазоне, а сцинтилляционный счетчик ионизирующего излучения 9 регистрирует

монохроматическое излучение с другой энергией, соответствующей условию Брэгга для кристаллического монохроматора-анализатора 7, и регистрирует скорость счета в другом спектральном диапазоне.

Излучение, прошедшее без отклонения, попадает в датчик контроля (монитор стабилизации) интенсивности рентгеновского излучения 10, который регистрирует общий ток, создаваемый излучением в чувствительном объеме, который несет информацию об интегральной интенсивности излучения в конкретный момент времени, и используется для мониторинга.

Одновременно, датчики измерения давления 11 и температуры 12 многофазной жидкости измеряют температуру и давление потока жидкости, используемые для уточнения значений коэффициентов поглощения компонент потока.

Данные от датчиков контроля и стабилизации интенсивности рентгеновского излучения 10, измерения давления 11 и температуры 12 многофазной жидкости, от сцинтилляционных счетчиков ионизирующего излучения 8 и 9 поступают на ЭВМ. При этом скорости счета по двум монохроматическим линиям, зарегистрированные счетчиками ионизирующего излучения 8 и 9 и датчиками измерения давления 11 и температуры 12 используются для расчета массовых долей отдельных компонент многофазной жидкости, и с помощью программного обеспечения решается система вида:

$$I(E_1) = I_0(E_1) \exp[-L \sum \mu_i(E_1, p, T) w_i \rho_i(p, T)];$$

$$I(E_2) = I_0(E_2) \exp[-L \sum \mu_i(E_2, p, T) w_i \rho_i(p, T)];$$

$$\sum w_i = 1,$$

где $I(E_{1,2})$ – интенсивность рентгеновского излучения с энергией $E_{1,2}$, падающего на поток многофазной жидкости; $I_0(E_{1,2})$ – интенсивность рентгеновского излучения с энергией $E_{1,2}$, прошедшего через поток без взаимодействия;

L – расстояние, пройденное излучением через поток многофазной жидкости; $\mu_i(E_{1,2}, p, T)$ – массовый коэффициент поглощения излучения с энергией $E_{1,2}$ при температуре T и давлении p для i -той компоненты; w_i – массовая доля (концентрация) i -той компоненты; $\rho_i(p, T)$ – плотность i -той компоненты при температуре T и давлении p .

Значения $I_0(E_1)$, $I_0(E_2)$ и т.д. определяю из измерений в отсутствие потока жидкости в трубе 3 или из предварительного моделирования, а $I(E_1)$, $I(E_2)$ и т.д. из скоростей счета при измерении на трубе 3 с потоком многофазной жидкости.

Таким образом, с помощью предложенного устройства при регистрации скоростей счета в двух спектральных диапазонах контролируют концентрации трехкомпонентных потоков, например, потока типа нефть-вода-газ.

Значения $I(E_1)$, $I_0(E_1)$, $I(E_2)$, $I_0(E_2)$ и т.д. нормируют в соответствии со значением тока, зарегистрированным датчиком контроля и стабилизации интенсивности рентгеновского излучения 10 в соответствующий момент времени, что позволяет уменьшить статистический разброс данных обусловленный флуктуациями тока и напряжения источника рентгеновского излучения 1.

Были проведены экспериментальные и расчетные оценки чувствительности предложенного устройства, показавшие чувствительность до 0,1% по массе за время одиночного измерения 1 секунда. На рисунке 14 приведены спектры, зарегистрированные в экспериментальном исследовании на примере эталонных жидкостей, представлявших собой дистиллированную воду и водные растворы NaCl различных концентраций.

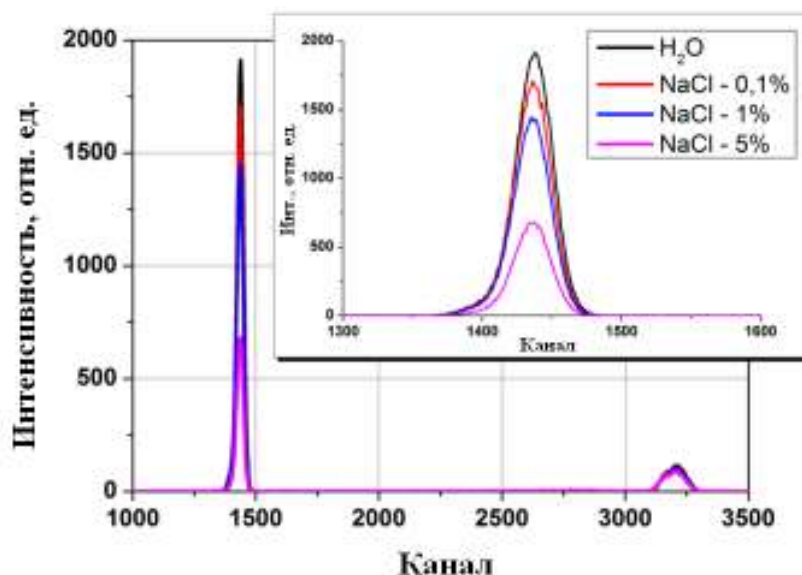


Рисунок 14 – Спектры РИ после прохождения емкостей, заполненных эталонными жидкостями в линейном масштабе

В **приложении А** приведено описание программного кода реализованного в рамках первой главы диссертации. В **приложении Б** приведены чертежи модуля для монохроматизации РИ на основе активного кварцевого элемента, описанного во второй главе. В **приложениях В, Г, Д, Е** копии полученных при выполнении работы патентов и свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. В **заключении** излагаются основные результаты диссертации.

Основные результаты работы

1. Реализован программный код, выполненный с использованием инструментария GEANT4, для численного моделирования спектральных характеристик рентгеновского излучения, генерируемого различными источниками для произвольной геометрии. Разработанный код позволяет рассчитывать спектральные характеристики генерирующих источников излучения. Одна из опций кода позволяет моделировать результаты взаимодействия зондирующего пучка с веществом.
2. Реализовано устройство адаптивной рентгеновской оптики (акустомонохроматор) на основе кристалла кварца, находящегося под внешним электромагнитным воздействием. Исследованы частотные и амплитудные зависимости интенсивности дифрагированного рентгеновского излучения в присутствии электромагнитного возбуждения кристалла. Показана возможность увеличения интенсивности дифрагированного в 5 раз при использовании адаптивной рентгеновской оптики по сравнению с традиционными монохроматорами.
3. Разработано устройство для элементного абсорбционного анализа на базе лабораторного источника рентгеновского излучения с использованием адаптивной рентгеновской оптики, позволяющее определять в составе пробы наличие примесей химических элементов в диапазоне элементов от Са до Pb, с концентрацией до 10^{-4} за время измерения 3 часа.
4. Разработано устройство для контроля для контроля компонентного состава многокомпонентных жидкостей в потоке, обеспечивающее определение компонент смеси с концентрацией до 0,1% за время одиночного измерения 1 секунда.

Цитированная литература

1. Грязнов, А. Ю. Разработка аппаратурных и методических способов повышения аналитических характеристик энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного анализатора: дис. ... канд. техн. наук: 05.27.02/ Грязнов Артем Юрьевич. – Санкт-Петербург, 2004.–132 с.
2. Асадчиков, В.Е., Бузмаков, А.В., Золотов, Д.А., и др. Лабораторные рентгеновские микротомографы на монохроматическом излучении/ В. Е. Асадчиков, А. В. Бузмаков, Д. А. Золотов и др. // Кристаллография.– 2010. – Т. 55. – № 1. – С. 167–176.
3. Башмаков, Ю. А., Бондаренко, Т. В., Полозов, С. М. Источник излучения для медицинской рентгенографии, основанный на использовании излучения электронов при каналировании в кристаллах/ Ю. А. Башмаков, Т. В. Бондаренко, С. М. Полозов // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2016. – № 2. – С. 13–18.
4. Falcone, G. Chapter 5 current status and limitations of multiphase flow metering/ G. Falcone // Developments in Petroleum Science. – 2009. – Vol. 54. – Pp. 191–228.
5. Scheers, A.M., Slijkerman, W.F.J. Multiphase flow measurement using multiple energy gamma ray absorption (MEGRA) composition measurement/ A.M. Scheers, W.F.J. Slijkerman// SPE Annual Technical Conference and Exhibition.–1996.– SPE-36593-MS.
6. Мкртчян, А.Р., Навасардян, М.А., Габриелян, Р.Г. и др. Полное зеркальное отражение излучения ангстремных длин волн на ультразвуковой сверхрешотке в случае Лауэ-геометрии/ А.Р. Мкртчян, М.А. Навасардян, Р.Г. Габриелян и др. //Письма в ЖТФ. –1983.– Т.9. –№ 11.–С.1181.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи

1. **Черепенников, Ю. М.** Рассеяние рентгеновского излучения в деформированных кристаллах/ А. С. Гоголев, Ю. М. Черепенников, С. Г. Стучебров, А. Р. Вагнер // Известия вузов. Физика. – 2011 – Т. 54 – № 11/2. – С. 262–266.
2. **Черепенников, Ю. М.** Определение оптимальных параметров источника рентгеновского излучения на базе малогабаритного ускорителя электронов/ А. С. Гоголев, Ю. М. Черепенников // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 2. – С. 35–38.
3. **Черепенников, Ю. М.** Метод снижения дозовой нагрузки при рентгеновской диагностике/ А. С. Гоголев, Ю. М. Черепенников, И. И. Кузнецов // Известия вузов. Физика. – 2012 – Т. 55– №. 11/2. – С. 313–317.
4. **Черепенников, Ю. М.** Устройство для рентгеновского абсорбционного спектрального анализа/ А. С. Гоголев, Ю. М. Черепенников, А. В. Бегаев // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 11/3. – С. 284–288.
5. **Cherepennikov, Y. M.** Acoustic "pumping effect" for quartz monochromators/ A. S. Gogolev, S. G. Stuchebrov, A. R. Vagner, Y. M. Cherepennikov, A. P. Potylitsyn // Journal of Physics: Conference Series. – 2012. – Vol. 357. – № 1.–Article number 012031. – Pp. 1–4.
6. **Cherepennikov, Y. M.** Method to reduce radiation exposure in the medical X-ray diagnostics/ Y. M. Cherepennikov, A. S. Gogolev // 7th International Forum on

Strategic Technology (IFOST – 2012): Proceedings: in 2 vol., Tomsk, September 18–21, 2012. – Tomsk: TPU Press, 2012. – Vol. 2. – Pp. 244–248.

7. **Cherepennikov, Y. M.** Device for X-ray spectral absorption analysis with use of acoustic monochromator/ Y. M. Cherepennikov, A. S. Gogolev // *Journal of Physics: Conference Series*. –2014. – Vol. 517. – № 1.–Article number 012037. – Pp. 1–5.
8. **Cherepennikov, Y. M.** WD-XRA technique in multiphase flow measuring/ A. S. Gogolev, Y. M. Cherepennikov, A. V. Vukolov, R. O. Rezaev, S. G. Stuchebrov, D. Hampai, S. B. Dabagov, A. Liedl, C. Polese // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B: Beam Interactions with Materials and Atoms* –2015. – Vol. 355. – Pp. 276–280.
9. **Cherepennikov, Y. M.** Estimation of the sensitivity in dual wave X-ray absorptiometry/ Y. M. Cherepennikov, A. S. Gogolev, R. O. Rezaev, A. V. Vukolov, T. S. Gogoleva // *Journal of Physics: Conference Series*. –2016. – Vol. 732. – № 1.– Article number 012032. – Pp. 1–6.
10. Патент РФ 2014122059/28, 31.05.2014. Гоголев, А. С., Резаев, Р.О., Черепенников, Ю. М. Устройство для определения компонентного состава потока многофазной жидкости // Патент России 2559119. 2015. Бюл. № 22.
11. Патент РФ 2014148937/28, 05.12.2014. Гоголев, А. С., Черепенников, Ю. М., Резаев, Р.О., Концентратомер многофазной жидкости // Патент России 154702. 2015. Бюл. № 25.
12. Патент РФ 2013119083/28, 24.04.2013. Гоголев, А. С., Черепенников, Ю. М., Кочарян, В. Р. Устройство для рентгеновского абсорбционного спектрального анализа // Патент России 132900. 2013. Бюл. № 27.

Тезисы и материалы докладов

1. **Черепенников, Ю. М.** Источники монохроматического рентгеновского излучения на базе малогабаритных ускорителей электронов/ Ю. М. Черепенников // Всероссийский конкурс научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области физических наук в рамках Всероссийского фестиваля науки: Сборник тезисов лауреатов, Томск, 25 Мая–5 Сентября 2011. – Томск: ТПУ, 2011. – С. 154–156.
2. **Черепенников, Ю. М.** Моделирование основных параметров источника монохроматического рентгеновского излучения [Электронный ресурс]/ Ю. М. Черепенников // *Современные техника и технологии: сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 9–13 Апреля 2012.* – Томск: ТПУ, 2012. – Т. 3. – С. 67–68. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
3. **Черепенников, Ю. М.** Определение оптимальных параметров источника рентгеновского излучения на базе малогабаритного ускорителя электронов [Электронный ресурс] / Ю. М. Черепенников // *Современные техника и технологии: сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 18–22 Апреля 2011.* – Томск: ТПУ, 2011. – Т. 3. – С. 91–92. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
4. **Cherepennikov, Y. M.** Acoustic “pumping effect” for quartz monochromators/ A. S. Gogolev, S. G. Stuchebrov, A. R. Vagner, Y. M. Cherepennikov, A. P. Potylitsyn// *Radiation from relativistic electrons in periodic structures (RREPS-11): Book of*

- Abstracts of IX International Symposium, Egham, September 12–16, 2011. – Tomsk: TPU Press, 2011. – Pp. 108.
5. **Черепенников, Ю. М.** Моделирование основных параметров источника рентгеновского излучения для низкодозовой медицинской диагностики/ Ю. М. Черепенников, А. С. Гоголев // Всероссийский конкурс научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области физических наук: Сборник трудов, Москва, 2 Мая-20 Сентября 2012. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – С. 229–233.
 6. **Cherepennikov, Y. M.** Using acoustic "pumping effect" to produce high-intensive monochromatic X-ray beams/ Y. M. Cherepennikov// RACIRI Summer School 2016: Convergent Science and Technology for Society: Participant's talks, Repino, August 21-28, 2016. – Moscow: Kurchatov Institute, 2016 - p. 11.
 7. **Cherepennikov, Y. M.** Comparison of one-and two-crystals scheme for dual wave X-ray absorptiometry/ Y. M. Cherepennikov, A. S. Gogolev, R. O. Rezaev, A. V. OGREBO // Charged and neutral particles channeling phenomena: Book of Abstracts of 6th International Conference, Capri, October 5–10, 2014. – Frascati: INFN, 2014. – Pp. 139.
 8. **Cherepennikov, Y. M.** The device for X-ray absorption spectral analysis with using of acoustic monochromator/ Y. M. Cherepennikov, A. S. Gogolev // Radiation from relativistic electrons in periodic structures (RREPS-13): Book of Abstracts of X International Symposium, Erevan, September 23–27, 2013. – Tomsk: TPU Publishing House, 2013. – Pp. 103.
 9. **Cherepennikov, Y. M.** Dual-wave X-ray absorptiometry in multiphase flow metering/ Y. M. Cherepennikov, R. O. Rezaev, S. G. Stuchebrov, A. R. Vagner // Radiation from relativistic electrons in periodic structures (RREPS-15): Book of Abstracts of XI International Symposium, Saint Petersburg, September 6–11, 2015. – Tomsk: TPU Publishing House, 2015. – Pp. 43.
 10. **Cherepennikov, Y. M.** Dose rate in one-photon and two-photon X-ray investigations/ S. G. Stuchebrov, Y. M. Cherepennikov, A. S. Gogolev, A. A. Krasnykh, A. R. Vagner // Charged and neutral particles channeling phenomena: Book of Abstracts of 6th International Conference, Capri, October 5–10, 2014. – Frascati: INFN, 2014. – Pp. 141.
 11. **Черепенников, Ю. М.** Волнодисперсионный рентгеновский анализ в многофазной расходомерии/ Ю. М. Черепенников, А. С. Гоголев // Современные проблемы физики и технологий: тезисы докладов IV международной молодежной научной школы-конференции: в 2 т., Москва, 17–22 Марта 2015. – Москва: НИЯУ МИФИ, 2015. – Т. 2. – С. 218.
 12. **Черепенников, Ю. М.** Двухфотонная рентгеновская абсорбциометрия [Электронный ресурс]/ Ю. М. Черепенников, А. С. Гоголев, А. В. Вуколов, Р. О. Резаев, С. Г. Стучебров // Физико-технические проблемы атомной науки, энергетики и промышленности: сборник тезисов докладов VI Международной научно-практической конференции, Томск, 5–7 Июня 2014. – Томск: ТПУ, 2014. – С. 92. – Режим доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2014/C49/C49.pdf>.
 13. **Черепенников, Ю. М.** Двухволновая рентгеновская абсорбциометрия/ Ю. М. Черепенников, А. С. Гоголев // Информационные технологии неразрушающего контроля: сборник трудов Российской школы конференции с международным участием, Томск, 27–30 Октября 2015. – Томск: ТПУ, 2015. – С. 210–213.

14. **Черепенников, Ю. М.** Двухволновая рентгеновская абсорбциометрия в многофазной расходомерии/ Ю. М. Черепенников, А. С. Гоголев // VI Школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов, Томск, 14–16 Октября 2015. – Северск: СТИ НИЯУ МИФИ, 2015. – С. 110.
15. **Черепенников, Ю. М.** Рентгеноабсорбционный анализатор потока многокомпонентной жидкости/ Ю. М. Черепенников, А. С. Гоголев // IV Международная школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов, Томск, 23–25 Октября 2013. – Томск: ТПУ, 2013. – С. 49.
16. **Черепенников, Ю. М.** Рентгеновский анализатор потока многофазной жидкости/ Ю. М. Черепенников // Студент и научно-технический прогресс: материалы 51-й Международной научной студенческой конференции, Новосибирск, 12–18 Апреля 2013. – Новосибирск: НГУ, 2013. – Т. Инструментальные методы и техника экспериментальной физики. – С. 33.