

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права

УДК 519.6;539.12.04;004.5;004.6;004.91

СЫТОВА

Светлана Николаевна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ,
ГЕНЕРИРУЕМОГО ПУЧКАМИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
В НЕОДНОМЕРНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННО-
ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

по специальности

05.13.18 – Математическое моделирование,

численные методы и комплексы программ

Минск – 2024

Научная работа выполнена в НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета.

Научный консультант – **Барышевский Владимир Григорьевич**,
доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник
НИУ «Институт ядерных проблем»
Белорусского государственного университета

Официальные
оппоненты:

Григорьева Елена Викторовна,
доктор физико-математических наук, доцент,
профессор кафедры высшей математики,
УО «Белорусский государственный
экономический университет»

Курочкин Юрий Андреевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий центром «Фундаментальные
взаимодействия и астрофизика»,
ГНУ «Институт физики им. Б.И. Степанова
Национальной академии наук Беларуси»

Малых Михаил Дмитриевич,
доктор физико-математических наук, доцент,
заведующий кафедрой математического
моделирования и искусственного интеллекта
факультета физико-математических и естественных
наук, ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы
народов им. Патриса Лумумбы»

Оппонирующая
организация –

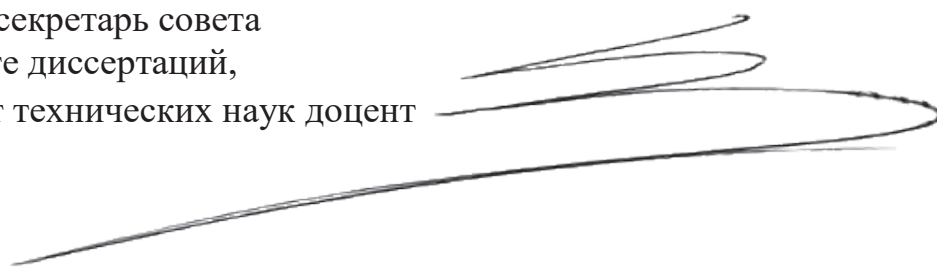
**Международная межправительственная научно-
исследовательская организация Объединенный
институт ядерных исследований (ОИЯИ)**

Защита состоится 9 января 2025 г. в 14:30 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.02 при Белорусском государственном университете по адресу: г. Минск, ул. Ленинградская 8 (корпус юридического факультета), ауд. 407. Телефон учёного секретаря: 209-57-09; e-mail: kochyn@bsu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан « 3 » декабря 2024 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций,
кандидат технических наук доцент



В.П.Кочин

ВВЕДЕНИЕ

Основная цель настоящей диссертации — исследование методами математического моделирования сложных нелинейных, в том числе хаотических динамических процессов, возникающих при прохождении пучков заряженных частиц через пространственно-периодические структуры и генерации электромагнитного излучения на примере объемных лазеров на свободных электронах (ОЛСЭ).

ОЛСЭ представляют собой электронные устройства, в которых в условиях динамической дифракции происходит генерация электромагнитного излучения заряженными частицами, движущимися в существенно неоднородной (двумерной и трехмерной) пространственно-периодической системе (среде, структуре) или другими словами — в резонаторе.

В рентгеновском диапазоне в качестве резонатора используются естественные кристаллы (кристаллические пластинки). В этом случае величина пространственного периода определяется периодом кристаллической решетки. Испускаемое излучение имеет длину, сравнимую с межатомными расстояниями, т.е. принадлежит рентгеновскому диапазону. В микроволновом диапазоне в качестве мишени используется искусственная дифракционная решетка — объемная периодическая система, состоящая из периодически натянутых металлических нитей.

Используемый механизм излучения в ОЛСЭ — это теоретически предсказанное в начале 70-х годов XX века и экспериментально открытое в 1985 г. сотрудниками НИИ ЯП БГУ параметрическое рентгеновское излучение и квазичеренковское излучение в других частотных диапазонах.

Принципы и теоретические основы функционирования ОЛСЭ были заложены в работах сотрудников НИИ ЯП БГУ, начиная с 1985 г. Первое экспериментальное наблюдение генерации ОЛСЭ в миллиметровом диапазоне было проведено в НИИ ЯП БГУ в 2001 г. В 2004 г. создана лампа обратной волны и ОЛСЭ с прямоугольным сеточным резонатором, работающие в сантиметровом диапазоне длин волн. В дальнейшем были проведены эксперименты с круглыми сеточными и фольговыми резонаторами — неоднородными пространственно-периодическими структурами, обладающими всеми свойствами фотонных кристаллов.

ОЛСЭ в различных диапазонах могут быть использованы для создания нового поколения ускорителей элементарных частиц, передачи электромагнитной энергии на большие расстояния, нагрева термоядерной плазмы, высокостабильных передатчиков для систем связи в СВЧ-диапазоне и т.д. — во

многих высокотехнологичных направлениях исследований, в экспериментальных диагностических целях и для различных медицинских применений. В настоящее время уже достигнуты необходимые параметры пороговых значений пучков заряженных частиц для начала генерации рентгеновского излучения ОЛСЭ на кристаллах. Также следует отметить недавние предложения по использованию ОЛСЭ в новой коллаборации Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ, г. Дубна, Россия) FLAP (Fundamental & Applied Linear Accelerator Physics collaboration), созданной вокруг уникальной установки ОИЯИ – линейного ускорителя электронов ЛИНАК-200.

Исследование линейного режима работы усилителей и генераторов электромагнитного излучения на основе пучков заряженных частиц может быть проведено аналитически. Оно позволяет получить оценки на стартовые условия и физические параметры изучаемого устройства, которые необходимы для его функционирования. Однако во всех случаях в реальных условиях линейный режим работы быстро сменяется нелинейной стадией. Математические модели, описывающие такую нелинейную стадию, представляют собой сложные системы многомерных нелинейных интегродифференциальных или дифференциальных уравнений в частных производных, не поддающиеся стандартной классификации их типов.

Понятно, что решение поставленных задач математического моделирования может быть проведено только с использованием различных численных методов, поскольку аналитически получить решения таких систем уравнений невозможно. Такое моделирование может облегчить и упростить проведение полноценных дорогостоящих физических экспериментов, а также уточнить исходные феноменологические модели физических процессов, выверить и систематизировать результаты экспериментальных исследований. Изучение возможностей функционирования устройств с точки зрения нелинейной динамики очень важно для повышения эффективности их работы и выбора их наиболее оптимальных параметров.

Десять лет назад также возникло понимание, что как полученные автором научные результаты исследований прохождения электронных пучков через пространственно-периодические структуры, так и любые другие научные результаты в широком спектре ядерных знаний должны быть не только сформулированы, получены и тщательно исследованы, но и систематизированы и должным образом сохранены в рамках создаваемой белорусской системы управления современными ядерными знаниями, охватывающими очень широкую предметную область. Для создания такой системы необходимо разрабатывать современные информационные

инструменты – систему управления контентом научно-образовательного портала, и создавать оригинальный белорусский портал ядерных знаний. Параллельно эти работы привели к их использованию и внедрению в области ядерной и радиационной безопасности. Цель создаваемой информационной системы для накопления, популяризации и сохранения научных знаний – аккумулировать в свободном доступе полученные знания, в том числе в области электронных генераторов и усилителей и, в частности, – в ОЛСЭ.

Таким образом, данная диссертационная работа находится на стыке нескольких наук – прикладной математики, ядерной физики, электродинамики, а также информатики.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами, темами

В основу диссертации легли исследования, выполненные в 1998 – 2024 годах в соответствии с утверждёнными планами научных работ НИИ ЯП БГУ.

Тема диссертации соответствует следующим Приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы (Указ Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 №156):

1. Цифровые информационно-коммуникационные и междисциплинарные технологии и основанные на них производства:

информационно-управляющие системы;

математика и моделирование сложных функциональных систем (технологических, биологических, социальных);

физика фундаментальных взаимодействий микро- и макромира, зарождающиеся технологии (квантовые, когнитивные, имплантируемые, антропоморфные).

Диссертационная работа выполнялась в рамках следующих НИР:

1) ГПФИ «Математические структуры», НИР «Разработка алгоритмов для решения эллипτικο-гиперболических многомерных задач с особенностями и численное моделирование физических процессов в объемных лазерах на свободных электронах», 2001–2005 гг., № гос. рег. 20015193;

2) ГПФИ «Поля и частицы», НИР «Теоретические и экспериментальные исследования коллективных процессов, протекающих в сильнооточных релятивистских пучках частиц, с целью обоснования возможности создания нового класса мощных ускорителей электронов и ионов, а также генераторов электромагнитного излучения, для использования в ядерной физике, физике высоких энергий и исследованию состояний вещества при экстремальных

концентрациях энергии, для создания систем удаленного энергообмена между орбитальными космическими аппаратами», 2006–2010 гг., № гос. рег. 20062608;

3) ГПОФИ «Высокоэнергетические, ядерные и радиационные технологии», задание «Исследование процессов высокоскоростного контактного взаимодействия и явлений динамической кумуляции, разработка энергетических коммутационных элементов взрывоманитных генераторов», 2006–2010 гг., № гос. рег. 20066745;

4) ГПНИ «Конвергенция», подпрограмма «Физика фундаментальных взаимодействий и плазма», задание 2.3.02 Теоретические и экспериментальные исследования процессов генерации мягкого рентгеновского излучения и сильнооточных релятивистских пучков на основе взрывной магнитной кумуляции энергии и емкостных накопителей и исследование нелинейных коллективных процессов, возбуждаемых релятивистскими пучками в фотонных кристаллах 2011–2013 гг., № гос. рег. 20111382;

5) ГПНИ «Конвергенция», подпрограмма «Физика фундаментальных взаимодействий и плазма» задание 2.3.05 «Теоретические и экспериментальные исследования процессов генерации сильнооточных релятивистских пучков на основе взрывной магнитной кумуляции энергии и емкостных накопителей и исследование нелинейных коллективных процессов, возбуждаемых релятивистскими пучками в фотонных кристаллах», 2014–2015 гг., № гос. рег. 20140532;

6) ГПНИ «Информатика и космос, научное обеспечение безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций», подпрограмма «Информатика», задание 1.35 «Разработка концепции, методов и компьютерных технологий создания электронного портала ядерных знаний учреждений образования Республики Беларусь с базой ядерных знаний и системой дистанционного обучения», 2014–2015 гг., № гос. рег. 20140494;

7) ГПНИ «Энергетические системы, процессы и технологии» подпрограмма 3 «Атомная энергетика и ядерно-физические технологии», задание 3.1.15 «Создание специализированного электронного портала ядерных знаний», 2016–2018 гг. № гос. рег. 20162323;

8) ГНТП «Интеллектуальные информационные технологии», задание 1-02 «Разработать методы, алгоритмы, компьютерные технологии и внедрить интеллектуальную информационную систему сотрудника Госатомнадзора Республики Беларусь для обеспечения контроля (надзора) в области ядерной и радиационной безопасности», 2016–2020 гг., № гос. рег. 20164271;

9) НИР «Разработать систему управления ядерными знаниями в Республике Беларусь» в рамках мероприятия 13 «Выполнение работ по оказанию научно-технической поддержки Министерству по чрезвычайным

ситуациям Республики Беларусь в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности» подпрограммы 3 «Научное обеспечение эффективной и безопасной работы Белорусской атомной электростанции и перспективных направлений развития атомной энергетики» ГП «Наукоёмкие технологии и техника» на 2021–2025 годы (2021-2025 гг., № гос. рег. 20213990);

10) ГПНИ «Цифровые и космические технологии, безопасность человека, общества и государства» на 2021–2025 годы, подпрограмма «Цифровые технологии и космическая информатика», НИР «Информационная система учета источников ионизирующего излучения, ядерного материала и радиоактивных отходов для предприятий и организаций Республики Беларусь» (2021–2025 гг., № гос. рег. 20210616);

11) НИР «Специализированная информационная архивная онлайн-система управления ядерными знаниями на базе учебно-научного электронного портала ядерных знаний Республики Беларусь BelNET» в рамках Мероприятия 3.1 Сводного перечня научных исследований и разработок по развитию государственной системы научно-технической информации Республики Беларусь на 2021–2025 годы (2022–2025 гг., № гос. рег. 20220250);

12) отдельный научный (конкурсный) проект Министерства образования Республики Беларусь «Исследование и численное моделирование нелинейной стадии работы объемных лазеров на свободных электронах», 2004–2006 гг., № гос. рег. 20043022;

13) договор Ф07В-001 «Некоторые аспекты теоретического исследования и математического моделирования лазеров на свободных электронах в диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых длин волн», 2007–2009 гг., № гос. рег. 2008151;

14) контракт № 196847 между НИИ ЯП БГУ и Тихоокеанской Северо-Западной национальной лабораторией (Министерство энергетики США) «Модернизация программного обеспечения Интегрированной информационной Системы Регулирования (РИИС) Госатомнадзора Республики Беларусь», 2013–2014 гг., № гос. рег. 20132630;

15) договор от 01.03.2017 №375/2017 между НИИ ЯП БГУ и 202 Химмотологическим центром горючего Вооружённых Сил Республики Беларусь «Исследование алгоритмов повышения производительности системы контроля качества и управления запасами ГСМ Вооружённых Сил Республики Беларусь» «E-lab ГСМ», 2017 г., № гос. рег. 20170574;

16) договор от 01.12.2017 № 435/2017 между НИИ ЯП БГУ и Госатомнадзором «Исследование подходов и разработка стратегии Госатомнадзора

по организации учета и контроля ядерных материалов, радиоактивных отходов и отработавшего ядерного материала», № гос. рег. 20172045;

17) договор от 08.08.2018 №489/2018 между НИИ ЯП БГУ и Госатомнадзором на разработку программного средства – модуля учета и контроля ядерных материалов, радиоактивных отходов и отработанного ядерного материала в рамках Интеллектуальной информационной системы сотрудника Госатомнадзора для обеспечения контроля (надзора) в области ядерной и радиационной безопасности на базе фреймворка eLab;

18) договоры от 18.11.2019 №553/2019, от 18.11.2019 №554/2019, от 03.08.2020 №600/2020, от 12.03.2021 №653/2021, от 12.03.2021 №653/2021, от 11.05.2022 №756/2022, от 15.12.2023 №849/2023 между Госатомнадзором и НИИ ЯП БГУ на оказание услуг по дальнейшему развитию Интеллектуальной информационной системы сотрудника Госатомнадзора.

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цели работы – разработка с использованием методов математического моделирования математического инструментария для изучения процессов генерации электромагнитного излучения пучками заряженных частиц при движении в различных неоднородных пространственно-периодических структурах, который позволит выбирать оптимальные параметры работы и повысить эффективность усилителей и генераторов перестраиваемого когерентного излучения в диапазонах от миллиметрового до рентгеновского для различных приложений в науке, технике и коммерческих разработках, а также создание информационной платформы для сохранения и популяризации ядерных знаний, в том числе полученных в рамках диссертационной работы.

Для достижения цели работы решались следующие *задачи*:

1) построение математических моделей процессов генерации излучения пучками заряженных частиц при прохождении различных неоднородных пространственно-периодических структур;

2) разработка эффективных разностных схем для решения нелинейных систем уравнений, описывающих разработанные математические модели;

3) создание комплекса программ для математического моделирования нелинейной динамики процессов излучения пучков заряженных частиц при прохождении неоднородных пространственно-периодических структур;

4) численное исследование линейной и нелинейной стадии функционирования различных типов ОЛСЭ;

5) исследование ОЛСЭ как динамического хаотического объекта с целью исследования возможного управления спектром выходного излучения;

б) разработка информационной системы для сохранения, передачи и популяризации научных знаний, в том числе ядерных знаний в целом и в области научных работ по созданию ОЛСЭ, в частности.

Объект исследования: электромагнитное поле, генерируемое при движении пучков заряженных частиц в условиях динамической дифракции в неоднородных пространственно-периодических структурах.

Предмет исследования: физические закономерности (линейные и нелинейные), описывающие функционирование объемных лазеров на свободных электронах (ОЛСЭ).

Научная новизна

Все результаты, представленные в диссертации, являются новыми и важными для развития и совершенствования ОЛСЭ.

Детальное математическое моделирование нелинейной стадии работы ОЛСЭ проведено впервые.

В работе рассмотрены двух-, трех- и многоволновые ОЛСЭ в различных спектральных диапазонах с электронными пучками, находящимися в синхронизме с проходящими через неоднородную пространственно-периодическую структуру (резонатор) электромагнитными волнами и волнами, возникающими в системе вследствие динамической брэгговской дифракции. Построены системы уравнений, описывающие динамику нелинейной стадии работы объемных лазеров на свободных электронах в условиях двух- и трехволновой объемной распределенной обратной связи. Впервые предложены обобщенные математические модели для различных геометрий объемных и поверхностных схем ОЛСЭ.

Для проведения быстрых вычислительных экспериментов по моделированию ОЛСЭ предложены разностные схемы, в том числе пригодные для распараллеливания. Разработан комплекс программ VOLC (*VOL*ume *C*ode) для экспресс-моделирования работы различных типов ОЛСЭ. На основе проведенного моделирования исследована нелинейная стадия квази-черенковской неустойчивости в различных геометриях.

В диссертации методами математического моделирования продемонстрировано выполнение всех основных физических закономерностей ОЛСЭ, полученных ранее в работах В. Г. Барышевского, в том числе порогов генерации и подавления паразитных мод в системе вследствие объемной распределенной обратной связи и динамической дифракции.

Моделирование ОЛСЭ проведено в широком диапазоне параметров. Исследованы возможности работы ОЛСЭ в режимах усиления и генерации. В

частности, изучены численно режим генерации и усиления в геометрии Брэгга (с установленными внешними зеркалами и без), режим усиления и режим SASE, а также режим генерации с внешними зеркалами в геометрии Лауэ, режимы усиления и генерации в трехволновом ОЛСЭ для геометрий Брэгг-Брэгг, Брэгг-Лауэ, Лауэ-Лауэ, включая режимы ЛОВ, ЛБВ, ЛОВ-ЛБВ, ЛОВ-ЛОВ-ЛБВ. Проведено моделирование работы ОЛСЭ в случае вырождения двух и трех корней дисперсионного уравнения в зависимости от параметра отстройки от точного выполнения условия Черенкова, факторов асимметрии и др. системных параметров. Численно исследована пороговая зависимость поведения решения от различных факторов в системе, в частности, от тока пучка, длины мишени, поглощения в системе, факторов асимметрии. Показано, что существует оптимальный набор параметров для эффективной генерации излучения в каждом из вышеперечисленных случаев.

Проведено математическое моделирование режимов работы созданных в НИИ ЯП БГУ установок ОЛСЭ-10 и ОЛСЭ-250. Получено хорошее согласие численных данных с результатами проведенных экспериментальных исследований данных установок, что позволяет заменить в будущем проведение многих физических экспериментов вычислительными экспериментами с использованием разработанного комплекса программ VOLC.

Все вышесказанное свидетельствует о достоверности полученных результатов, а комплекс программ VOLC представляет несомненную практическую значимость.

Впервые показано, что ОЛСЭ является хаотической динамической системой. Исследованы различные режимы его работы. Предложены методы контроля и способы управления хаосом в ОЛСЭ. Показано, что неоднородная геометрия дифракции представляет сложную картину переходов между различными хаотическими динамическими режимами и позволяет специальным выбором параметров геометрии (изменение геометрии) получить большие значения амплитуд полей при генерации ОЛСЭ, а также принципиально другие типы решения. Независимые исследования 2019 г. подтвердили, что ОЛСЭ является хаотической системой.

Предложена концепция, разработаны алгоритмы на основе процессного системного подхода и с использованием семантических технологий и разработана система управления контентом научно-образовательного портала eLab-Science. На ее основе создан семантический портал ядерных знаний BelNET <https://belnet.by/> для популяризации и сохранения научных ядерных знаний, в том числе в области ОЛСЭ, ЛСЭ, ускорительной техники, а также в других областях ядерных знаний – единственный крупный научно-технический информационный ресурс в области ядерных знаний в Республике

Беларусь в настоящее время. На основе портала BelNET создается система управления ядерными знаниями Республики Беларусь и специализированная информационная архивная онлайн-система управления ядерными знаниями.

Положения, выносимые на защиту

1. Обобщенные математические модели, описывающие нелинейную стадию работы различных типов объемных лазеров на свободных электронах во всех спектральных диапазонах и позволяющие моделировать математическими методами сложную трехмерную динамику электронного пучка и электромагнитных волн в ОЛСЭ.

2. Разностные схемы решения многомерных нелинейных систем интегро-дифференциальных уравнений для проведения экспресс-моделирования работы различных типов ОЛСЭ, а также для моделирования поверхностных электромагнитных волн и поверхностных плазмонов.

3. Полученные численно на основе предложенных разностных схем и разработанного комплекса программ VOLC физические закономерности функционирования ОЛСЭ, в том числе пороги генерации и подавление паразитных мод в системе, позволяющие моделировать работу экспериментальных установок ОЛСЭ в будущих экспериментах.

4. Показано, что ОЛСЭ является хаотической динамической системой, основные свойства которой, такие как подавление паразитных мод в системе вследствие объемной распределенной обратной связи и динамической дифракции, возможность через изменение геометрии дифракции и использование внешних сигналов получить принципиально другой тип решения, важны для выбора в будущих экспериментальных исследованиях оптимальных режимов работы ОЛСЭ.

5. Принципы функционирования и алгоритмы для системы управления контентом научно-образовательного портала eLab-Science с использованием семантических технологий в рамках фреймворка eLab на основе свободного программного обеспечения и созданный на ее основе научно-образовательный портал ядерных знаний BelNET для популяризации и сохранения ядерных знаний, в том числе в области ОЛСЭ, как составная часть белорусской системы современных ядерных знаний.

Личный вклад соискателя

Все результаты и данные, представленные в работе, получены автором самостоятельно. Из совместных работ в диссертацию включены результаты,

полученные при непосредственном участии автора либо под ее научным руководством. В частности, совместно с К.Г.Батраковым получена система уравнений, описывающая нелинейную стадию двухволнового ОЛСЭ с широким в поперечном сечении электронным пучком. В.Г.Барышевский сформулировал постановку некоторых физических задач по исследованию нелинейной стадии работы ОЛСЭ.

Автором диссертации были построены обобщенные математические модели ОЛСЭ, разработаны и исследованы разностные схемы для решения предложенных интегро-дифференциальных систем уравнений, описывающих различные типы ОЛСЭ, разработан комплекс программ VOLC для экспресс-моделирования ОЛСЭ и с его помощью проведено математическое моделирование различных геометрий и вариантов ОЛСЭ, численно получены все основные физические закономерности функционирования ОЛСЭ, а также впервые проведено исследование ОЛСЭ как хаотической динамической системы, включая методы контроля и управления хаосом в ОЛСЭ.

Предложена идея и осуществлено научное руководство разработкой системы управления контентом научно-образовательного портала eLab-Science и на ее основе создан белорусский портал ядерных знаний BelNET, обеспечено его бесперебойное функционирование. Предложено использовать процессный системный подход и семантические технологии, на основе которых разработаны оригинальные алгоритмы, лежащие в основе системы управления контентом eLab-Science. На основе фреймворка eLab разработаны и внедрены программные продукты для контроля за ядерной и радиационной безопасностью. Данные работы позволили дополнительно верифицировать систему управления контентом научно-образовательного портала eLab-Science. Разработаны оригинальные материалы для контента портала в области ОЛСЭ, в том числе в области математического моделирования ОЛСЭ, а также большое количество других материалов. Под научным руководством автора диссертации создается система управления ядерными знаниями в Республике Беларусь.

Результаты, полученные другими соавторами или с другими соавторами, в диссертацию не включены.

Апробация результатов диссертации и информация об использовании ее результатов

Изложенные в диссертации результаты исследований были представлены автором на международных конгрессах, симпозиумах, конференциях, школах, семинарах: 26th International Free Electron Laser

Conference & 11th FEL Users Workshop (FEL2004) (Trieste, Italy, Aug. 29 – Sept. 3 2004), Международных школах-семинарах «Актуальные проблемы физики микромира» – «Actual Problems of Microworld Physics» (Гомель, 25 июля – 05 августа 2005 г., 23 июля – 03 августа 2007 г., 15–26 июля 2009 г., 01–12 августа 2011 г., 22 июля – 02 августа 2013 г., 27 июля – 07 августа 2015 г., Гродно. 12 – 24 августа 2018 г., Минск, 27 августа – 03 сентября 2023 г.), International Conference on Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena (Frascati, Rome, Italy, July 3–7 2006), XX, XXV Всероссийской конференции по ускорителям заряженных частиц RuPAC2006, RuPAC2016 (Новосибирск, 10–14 сентября 2006 г., С.-Петербург, 21–25 ноября 2016 г.), 28th, 29th International Free Electron Laser Conference FEL2006, FEL2007 (Berlin, Germany, August 27 – Sept. 01 2006 г., Новосибирск, 26–31 августа 2007 г.), Второй Международной конференции «Nonlinear Dynamics-2007» (Харьков, 25–28 сентября 2007 г.), X, XIII Белорусской математической конференции (Минск, 3–7 ноября 2008 г., 22–25 ноября 2021 г.), 4-й, 6-й, 8-й, 9-й, 10-й, 11-й, 12-й, 14-й, 15-й, 16-й, 17-й, 20-й международной конференции «Mathematical Modelling and Analysis» (Vilnius, Lithuania, June 3-4 1999, May 31–June 2 2001, Trakai, Lithuania, May 28–31 2003, June 1–5 2005, May 30 – June 2 2007, Jurmala, Latvia, May 27–29 2004, Jurmala–Riga, Latvia, May 31 – June 4 2006, Daugavpils, Latvia, May 27–30 2009, Druskininkai, Lithuania, May 26–29 2010, Sigulda, Latvia, May 25–28 2011, May 26–29 2015, Tallinn, June 6–9 2012), XXIII, XXIV, XXVI, XXVIII, XXIX, XXX annual seminar «Nonlinear Phenomena in Complex Systems. Fractals, Chaos, Phase Transitions, Self-organization» (Минск, 24–27 мая 2016 г., 16–19 мая 2017 г., 21–24 мая 2019 г., 18–21 мая 2021 г., 21–24 июня 2022 г., 19–23 июня 2023 г.), 6-th EUROMECH Nonlinear Dynamics Conference (ENOC-2008) (С.-Петербург, 30 июня – 4 июля 2008 г.), X, XIII Белорусских математических конференциях (Минск, 3–7 ноября 2008 г., 22–25 ноября 2021 г.), 14-й, 15-й Международной зимней школе-семинаре по электронике сверхвысоких частот и радиофизике (Саратов, 3–8 февраля 2009 г., 6–11 февраля 2012 г.), Международной научно-практической конференции «Веб-программирование и интернет-технологии» WebConf 2009, WebConf 2015, WebConf 2018, WebConf 2021 (Минск, 8–10 июня 2009 г., 12–14 мая 2015 г., 14–18 мая 2018 г., 18–21 мая 2021 г.), Международной школе-конференции «Foundations & Advances in Nonlinear Science» (Минск, 22–25 сентября 2008 г., 20–23 сентября 2010 г., 24–28 сентября 2012 г., 29 октября – 3 октября 2014 г., 27–30 сентября 2016 г., 24–28 сентября 2018 г., 28 сентября – 2 октября 2020 г., 26–30 сентября 2022 г.), IX, X Международной школе «Хаотические автоколебания и образование структур» (ХАОС-2010, -2013) (Саратов, 4–9 октября 2010 г., 7–12 октября 2013 г.), 6-й Международной конференции

«Аналитические методы анализа и дифференциальных уравнений» (Минск, 12–17 сентября 2011 г.), III, IV, V, VI, VII Конгрессе физиков Беларуси (Минск, 25–27 сентября 2011 г., 24–26 апреля 2013 г., 27–30 октября 2015 г., 20–23 ноября 2017 г., 26–28 апреля 2023 г.), 6-й Международной конференции «Аналитические методы и дифференциальные уравнения» (AMADE2011) (Минск, 12–17 сентября 2011 г.), Международном конгрессе по информатике «Информационные системы и технологии» CSIST'2013, '2016, '2022 (Минск, 04–07 ноября 2013 г., 24–27 октября 2016 г., 27–28 октября 2022 г.), Международной научно-технической конференции, приуроченной к 50-летию МРТИ–БГУИР (Минск, 18–19 марта 2014 г.), 64-й Международной конференции «Fundamental problems of nuclear physics, atomic power engineering and nuclear technologies» NUCLEUS-2014 (Минск, 01-04 июля 2014 г.), IV, VI Международной конференции «Ядерные технологии XXI века» (Минск, 21–23 октября 2014 г., 25–27 октября 2016 г.), 11-м семинаре по европейскому сотрудничеству в области высшего образования и исследований по ядерной инженерии и радиологической защите (Минск, 1–5 июня 2015 г.), Международном симпозиуме «Mathematics of XXI Century & Natural Science» (С.-Петербург, 29 сентября – 03 октября 2015 г.), 11-м Международном семинаре «Workshop on European Collaboration for Higher Education and Research in Nuclear Engineering and Radiological Protection» (Минск, 01–05 июня 2015 г.), Международном семинаре «Проблемы физики фундаментальных взаимодействий – теория, феноменология, эксперимент» ProFI-2015 (Гомель, 19–20 ноября 2015 г.), 5-й, 6-й Международной конференции «Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии» ISMART 2016, 2018 (Минск, 26–30 сентября 2016 г., 09–12 октября 2018 г.), 7-й Международной научной конференции по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения Milex'2017 (Минск, 20–22 мая 2017 г.), IX, X, XI, XII Международной научно-технической конференции «Информационные технологии в промышленности, логистике и социальной сфере» ИТИ*2017, *2019, *2021, *2023 (Минск, 23–24 мая 2017 г., 23–24 мая 2019 г., 26–27 мая 2021 г., 21–22 сентября 2023 г.), IV научно-практической конференции с международным участием «Экологическая и радиационная безопасность объектов атомной энергетики» (Калининград, 18–19 октября 2017 г.), Международной научно-технической конференции «Open Semantic Technologies for Intelligent Systems» OSTIS-2018 (Минск, 15–17 февраля 2018 г.), II Международной научно-технической конференции «Автоматизированные системы управления технологическими процессами АЭС и ТЭС» (Минск, 27–28 апреля 2021 г.), XXI, XXII Международной научно-технической конференции «Развитие

информатизации и государственной системы научно-технической информации» РИНТИ–2022, –2023 (Минск, 17 ноября 2022 г., 16 ноября 2023 г.), 23-й Международной научной конференции «Сахаровские чтения 2023 года: экологические проблемы XXI века» (Минск, 18–19 мая 2023 г.), Международной осенней конференции Корейского физического общества 2023 KPS Fall Meeting (г. Чанвон, Южная Корея, 24–27 октября 2023 г.).

Результаты научных исследований внедрены в Департаменте по ядерной и радиационной безопасности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, НИИ ЯП БГУ, университете Tor Vergata (URTV, Рим, Италия), а также в учебном процессе кафедры теоретической физики ГГУ имени Ф. Скорины и химического факультета БГУ.

Получены 4 свидетельства о регистрации компьютерной программы в Национальном центре интеллектуальной собственности Республики Беларусь.

Результаты диссертации доложены и обсуждались на научных семинарах Суперкомпьютерного Центра (Supercomputing Center) Корейского института научных и информационных технологий (Korean Institute of Science and Technology Information – KISTI, г. Теджон, Южная Корея) 23 октября 2023 г. и Лаборатории информационных технологий ОИЯИ (г. Дубна, Россия) 22 ноября 2023 г., а также на научном семинаре в УО «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого» 31 марта 2023 г.

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 110 научных работах, из которых: 1 единолично изданная монография (объемом 44,5 авторского листа), 29 статей в научных изданиях, включенных в Перечень изданий, и в иностранных научных изданиях (общим объемом 20 авторских листов), из них 18 статей – без соавторов, 8 статей в других научных изданиях, 37 статей в сборниках материалов научных конференций, 35 тезисов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня сокращений и обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав основной части (включая разделы и подразделы), заключения, списка использованных источников и приложений. Полный объем диссертации составляет 308 страниц, включая 139 рисунков на 87 страницах, приложения на 25 страницах. Список использованных источников содержит 464 наименования на 43 страницах, включая 354 наименования на 26 страницах и 110 публикаций соискателя на 17 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Глава 1 посвящена выводу нескольких математических моделей процессов излучения пучков заряженных частиц в пространственно-периодических структурах – а именно в различных типах ОЛСЭ. Сначала рассматриваются различные двухволновые и трехволновые геометрии динамической дифракции в случае объемной геометрии ОЛСЭ. Приведен подробный вывод всех математических моделей, начиная от уравнений Максвелла, с использованием необходимых общепринятых приближений.

Все модели состоят из системы уравнений, полученных из уравнений Максвелла и описывающих динамику электромагнитного поля в системе, а также уравнений, описывающих поведение электронного пучка (одного или нескольких) при прохождении пространственно-периодической структуры – резонатора. Модели дополнены начальными и граничными условиями, задаваемыми для полей и пучка на тех границах мишени, на которую они приходят снаружи. Граничные условия могут описывать наличие внешних зеркал в системе, связывая между собой электромагнитные волны, приходящие с разных границ резонатора, а также стык нескольких секций резонатора в случае многосекционного ОЛСЭ.

Физические принципы функционирования ОЛСЭ основаны на прохождении заряженных частиц через пространственно-периодические резонаторы при наличии динамической дифракции электромагнитного излучения в них. Данные принципы справедливы для всех частотных диапазонов.

В динамической теории рентгеновской дифракции при прохождении электромагнитной волны через кристалл (мишень, резонатор) наблюдается смещение отрицательных зарядов и некоторая поляризация мишени. Под влиянием внешнего поля здесь возникает возмущенная электронная плотность и дополнительный шредингеровский ток, а электромагнитное поле зависит от данного возмущения. Оно описывается с помощью уравнений Максвелла и учитывает многочисленные переотражения излучения внутри мишени.

Параметрическое рентгеновское излучение представляет собой квазичеренковское излучение в рентгеновской области спектра вблизи брэгговских углов и брэгговских частот, определяемое условием дифракции на кристаллографических плоскостях. Трехмерный (объемный) характер распределенной обратной связи в ОЛСЭ изменяет кардинальным образом функциональную зависимость инкремента неустойчивости и порогов генерации. Термин квазичеренковское «параметрическое рентгеновское

излучение» подчеркивает физическую общность этого явления с излучением Вавилова-Черенкова.

Рассмотрим простейшую математическую модель двухволнового ОЛСЭ в объемной геометрии (**раздел 1.2**). На рисунке 1 изображена схема ОЛСЭ в геометрии Брэгга. Пусть электронный пучок со скоростью u и плотностью j_b «падает» под некоторым углом на полубесконечную трехмерную пространственно-периодическую мишень толщиной L . Одновременно на мишень может падать плоская электромагнитная волна с частотой ω и волновым вектором $\mathbf{k}$ (волна 1 на рисунке 1). Если эта волна находится в условиях дифракции, то в мишени образуется дифрагированная волна с волновым вектором $\mathbf{k}_\tau = \mathbf{k} + \boldsymbol{\tau}$ (волна 2 на рисунке 1), где $\boldsymbol{\tau}$ – вектор обратной решетки, а условие дифракции для данных волновых векторов имеет вид: $2\mathbf{k}\boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}^2 \approx 0$. В общем случае возможен также вариант падения на мишень волны 3 с волновым вектором $\mathbf{k}_\tau$, приходящей через ее заднюю стенку, либо обеих волн – 1 и 3 одновременно.

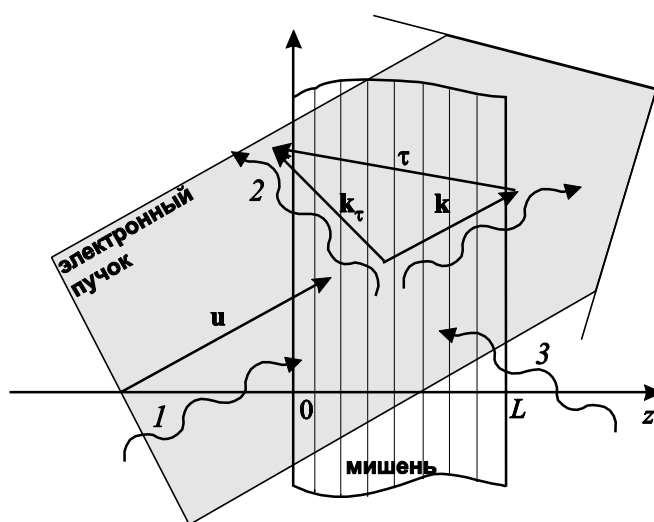


Рисунок 1 – Объемная схема ОЛСЭ в геометрии Брэгга

Чтобы электроны в мишени начали испускать квазичеренковское излучение, необходимо, чтобы фазовая скорость электромагнитной волны была несколько меньше скорости электронного пучка. Для этого необходимо выполнение условия Вавилова–Черенкова $\frac{|\omega - \mathbf{k}\mathbf{u}|}{\omega} = \delta \ll 1$ для отклонения δ от точного выполнения данного условия синхронизма.

При одновременном выполнении приведенных условий дифракции и синхронизма спонтанное излучение преобразуется в квазичеренковское излучение с частотой ω и волновыми векторами $\mathbf{k}$ и $\mathbf{k}_\tau$.

Порядок величины отклонения от точного выполнения условия Вавилова-Черенкова δ определяется либо длиной области взаимодействия электронного пучка с волной (в случае слабого усиления) либо плотностью электронного пучка (в случае сильного усиления).

При построении линейной теории ОЛСЭ и исследовании линейного режима его работы было показано, что в геометрии Брэгга могут быть реализованы несколько различных режимов работы: 1) величина плотности тока пучка j_b меньше критической, тогда усиления либо генерации излучения нет; 2) при достижении первой критической величины тока $j_b = j_{th1}$ становится возможен режим усиления электронным пучком внешних падающих электромагнитных волн; 3) при дальнейшем увеличении тока j_b и превышении им второго порогового значения j_{th2} реализуется режим генерации. В главе 3 эти режимы исследованы методами математического моделирования.

В случае формирования двух сильных волн в системе вследствие динамической дифракции решение ищется в виде:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{e} (E(\mathbf{r}, t)e^{i(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t)} + E_\tau(\mathbf{r}, t)e^{i(\mathbf{k}_\tau\mathbf{r} - \omega t)}), \quad (1)$$

где i – мнимая единица, $\mathbf{e}$ – вектор поляризации, $\mathbf{r} = (x, y, z)$, E и E_τ – амплитуды двух сильных (проходящей и дифрагированной) электромагнитных волн, образующихся в системе вследствие динамической дифракции.

Используя приближение медленно меняющихся амплитуд, можно получить следующую систему уравнений для двухволнового ОЛСЭ:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{k_z c^2}{\omega} \frac{\partial E}{\partial z} + \frac{i}{2} \frac{(\mathbf{k}^2 - \omega^2 / c^2 \varepsilon_0) c^2}{\omega} E - \frac{i}{2} \omega \chi_\tau E_\tau &= -\frac{2\pi i}{\omega} \frac{\partial j}{\partial t} (\mathbf{n}_u \mathbf{e}) e^{-i(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t)}, \\ \frac{\partial E_\tau}{\partial t} + \frac{(k_z + \tau_z) c^2}{\omega} \frac{\partial E_\tau}{\partial z} - \frac{i}{2} \omega \chi_{-\tau} E + \frac{i}{2} \frac{(\mathbf{k}_\tau^2 - \omega^2 / c^2 \varepsilon_0) c^2}{\omega} E_\tau &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $\mathbf{n}_u$ – единичный вектор в направлении распространения пучка, j – плотность тока пучка заряженных частиц. Данная система может быть записана в общем матричном виде. Обозначим правую часть (2) как $F(j)$. Ее вывод рассмотрен в разделе 1.4 диссертации.

Следует обратить внимание, что система (2) (а также все системы для объемных вариантов ОЛСЭ, рассматриваемые в работе) является одномерной (1D) с одной пространственной координатой z . Тем не менее, они хорошо описывают неоднородность геометрии динамической дифракции, что вместе с моделированием широкого в поперечном сечении электронного пучка дает хорошие результаты по моделированию двумерных и трехмерных систем.

Далее выводится система, учитывающая дисперсию электромагнитных волн в резонаторе. В случае сеточного резонатора (фотонного кристалла) дисперсия зависит от материала, толщины нитей, периода их натяжения и других факторов и должна учитываться при моделировании ОЛСЭ, что подтверждено методами математического моделирования в главе 3.

Общий вид граничных условий с учетом внешних зеркал, установленных для обеспечения дополнительной объемной распределенной связи, может быть записан следующим образом:

$$\begin{aligned} E|_{z=0} &= E_0 + \alpha_1 E|_{z=L} \exp(i\varphi_1) + \alpha_2 E_\tau|_{z=0} \exp(i\varphi_2), \\ E_\tau|_{z=L} &= E_{\tau 0} + \alpha_3 E|_{z=L} \exp(i\varphi_3) + \alpha_4 E_\tau|_{z=0} \exp(i\varphi_4), \end{aligned} \quad (3)$$

где α_j , φ_j , $j=1, \dots, 4$, – амплитуды и фазы коэффициентов связи соответствующих волн при отражении.

В **разделе 1.3** рассматриваются три различные схемы трехволнового ОЛСЭ, когда в системе в силу выполнения условий дифракции формируются три сильные электромагнитные волны с волновыми векторами $\mathbf{k}$, $\mathbf{k}_1 = \mathbf{k} + \boldsymbol{\tau}_1$, $\mathbf{k}_2 = \mathbf{k} + \boldsymbol{\tau}_2$ при наличии двух векторов обратной решетки $\boldsymbol{\tau}_1$ и $\boldsymbol{\tau}_2$, а также общий случай n -волновой дифракции. Получена система уравнений для трехволнового случая. Проводится анализ соответствующих дисперсионных уравнений.

В **разделе 1.4** рассматривается математическая модель пучка заряженных частиц с использованием усреднения по фазам влета электронов в область взаимодействия. Всюду в диссертации рассматривается замагниченный пучок, создаваемый сильным ведущим магнитным полем. В таком пучке скорость электронов при влете в мишень имеет только одну продольную составляющую и динамика электронного пучка имеет одномерный характер. В общем случае ОЛСЭ волновые векторы дифрагированных электромагнитных волн в системе некомпланарны направлению движения частиц пучка и это должно учитываться при получении уравнений, описывающих динамику электронного пучка.

Приведем правую часть $F(j)$ системы уравнений (2):

$$F(j) = \Phi \int_0^{2\pi} \left(e^{-i\Theta(t,z,p)} + e^{-i\Theta(t,z,-p)} \right) \frac{2\pi - p}{8\pi^2} dp, \quad (4)$$

где Φ – коэффициент, включающий, в том числе, угол Брэгга, $\theta(t, z, p)$ – фаза электронного пучка по отношению к электромагнитному полю, $-2\pi \leq p \leq 2\pi$. $\theta(t, z, p)$ определяется следующим образом:

$$\frac{\partial^2 \Theta(t, z, p)}{\partial z^2} = \frac{e\Phi}{m\gamma^3 \omega^2} \left(k_z - \frac{\partial \Theta(t, z, p)}{\partial z} \right)^3 \operatorname{Re} \left(E(t - z/u, z) e^{i\Theta(t, z, p)} \right), \quad (5)$$

$$\Theta(t, 0, p) = p, \quad \frac{\partial \Theta(t, 0, p)}{\partial z} = k_z - \omega / u,$$

где Φ – угол Брэгга.

В **разделе 1.5** рассматривается выполнение законов сохранения для приведенных систем уравнений.

В **разделе 1.6** проводится обзор различных схем ОЛСЭ, включая схемы ОЛСЭ на основе фотонного кристалла в цилиндрическом волноводе экспериментальной установки ОЛСЭ-250 НИИ ЯП БГУ, где широкий в поперечном сечении электронный пучок проходит через систему натянутых тонких металлических нитей или фольг, и экспериментальной установки НИИ ЯП БГУ ОЛСЭ-10, на которой впервые была получена генерация излучения.

Далее рассматривается схема ОЛСЭ с объемными дифракционными решетками – так называемый поверхностный квазичеренковский ОЛСЭ, одна из возможных схем которого изображена на рисунке 2.

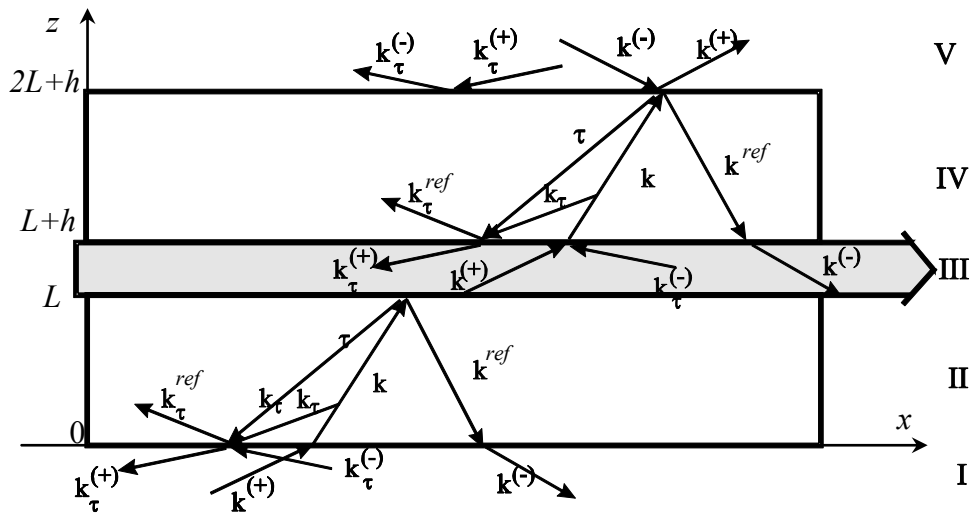


Рисунок 2 – Схема ОЛСЭ с двумя объемными дифракционными решетками

Если в предыдущих моделях электронный пучок находился в области дифракции электромагнитных волн в резонаторе, то данная модель описывает тонкий ленточный пучок, движущийся в вакууме над поверхностью или в щели между поверхностями объемной дифракционной решетки. Здесь ОРОС формируется вследствие динамической дифракции внутри решеток. На рисунке 2 области I и V есть вакуум, II и IV – дифракционные решетки. В области III летит электронный пучок. В каждой области рассматриваются по 4 волны –

проходящая, дифрагированная и соответствующие им отраженные от границ области электромагнитные волны.

В общем случае поверхностного ОЛСЭ, учитывающего одну, две или несколько дифракционных решеток и, возможно, несколько электронных пучков, движущихся в промежутке между ними, система уравнений и граничных условий относительно вектора амплитуд поля E в обобщенном матричном виде может быть записана следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} + A \frac{\partial E}{\partial z} + B \frac{\partial E}{\partial x} + QE = U(j), \\ A^- \frac{\partial E}{\partial t} + B^- \frac{\partial E}{\partial x} + C^- E + A^+ \frac{\partial E}{\partial t} + B^+ \frac{\partial E}{\partial x} + C^+ E = G(x, t, E^{(0)}, j). \end{aligned} \quad (6)$$

Во втором уравнении (6), описывающем граничные условия, выделены слагаемые для волн, приходящих на границу (они помечены знаком “-”), и волн, выходящих с данной границы (“+”). Это сделано для удобства записи разностных уравнений. Все матрицы $A^\pm$, $B^\pm$ и $C^\pm$ не являются диагональными, поскольку каждое граничное условие слева содержит амплитуды различных волн (включая две, удовлетворяющие брэгговским условиям) плюс справа внешние падающие волны $E^{(0)}$. Существует вариант, когда в случае границ типа II–III и III–IV имеется комбинация нескольких волн и соответствующих компонент вектора плотности тока пучка j .

Кинетические уравнения для одного электронного пучка в случае поверхностного ОЛСЭ могут быть записаны в общем виде:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + v \frac{\partial F}{\partial x} + \mathcal{E}(E) \frac{\partial F}{\partial v} + PF = D(E, f_0), \quad (7)$$

где $F = (f^{(0)}, f_+^{(1)}, f_-^{(1)}, f_+^{(2)}, f_-^{(2)}, f_1)^T$.

Для электронного пучка считаем, что он находится в синхронизме с волнами с волновыми векторами $k^{(\pm)}$ и задается следующей функцией:

$$f(z, x, v, t) = f_0 + f^{(0)} + \sum_{j=1}^2 (f_+^{(j)} \exp(i(k^{(+)}r - \omega t) + f_-^{(j)} \exp(i(k^{(-)}r - \omega t)) + (k.c.)), \quad (8)$$

где f_0 – невозмущенная функция распределения пучка.

В случае нескольких дифракционных решеток кинетические уравнения (7) считаются для каждого пучка, движущегося в промежутке между ними. Это первая обобщенная модель ОЛСЭ, полученная в диссертации.

Объемная модель ОЛСЭ с учетом многоволновой геометрии и нескольких пучков заряженных частиц в синхронизме с электромагнитными волнами в системе получена в разделе 1.7.

Пусть резонатор ОЛСЭ длиной L состоит из l секций с отличающимися параметрами. Рассмотрим область $\Omega = \bigcup_{i=1}^l G_i \cup \{-2\pi \leq p \leq 2\pi\} \cup \{t > 0\}$, $G_i = [z_i^1, z_i^2]$, $z_i^2 = z_{i+1}^1$, $z_1^1 = 0$, $z_l^2 = L$.

Пусть в системе в условиях динамической дифракции образуются N электромагнитных волн $E_i(z, t)$ по n_i волн в каждой i -той секции, $\sum_{i=1}^l n_i = N$.

Пусть на систему падает $M = M^{left} + M^{right}$ пучков электронов: M^{left} пучков, пришедших с границы $z = 0$, и M^{right} пучков, пришедших с границы $z = L$. Каждый пучок с начальной скоростью u_m описывается фазой $\theta_m(t, z, p)$ электронов относительно электромагнитной волны и считается во всей области $\mathbf{G}$. В каждой секции он может находиться в синхронизме с одной волной E_α с волновым вектором $\mathbf{k}_\alpha$. Мы не рассматриваем синхронизм пучка одновременно с несколькими волнами, поскольку он недостижим по параметрам дифракции.

Тогда в приближении медленно меняющихся амплитуд система уравнений поля относительно вектора амплитуд $\mathbf{E} = (E_1, E_2, \dots, E_N)^T$, $E_j = E_j(t, z)$, $z \in G_i$, $j = \sum_{k=1}^{i-1} n_k + j$, $j = 1, 2, \dots, n_i$ и вектора правых частей размерности N : $\mathbf{F} = (F_1, F_2, \dots, F_M, 0, \dots, 0)^T$ может быть записана в матричном виде следующим образом:

$$\mathbf{A} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{B} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial z} + \mathbf{C} \mathbf{E} = \mathbf{D} \mathbf{F}, \quad (9)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 + a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1N} \\ a_{21} & 1 + a_{22} & \cdots & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1} & a_{N2} & \cdots & 1 + a_{NN} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} b_{11} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & b_{NN} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{C} = (c_{kj}),$$

$$\mathbf{D} = (d_{kj}),$$

$$F_m = \Phi_m \int_0^{2\pi} \frac{2\pi - p}{4\pi} \left(e^{-i\theta_m(t, z, p)} + e^{-i\theta_m(t, z, -p)} \right) dp, \quad m = 1, 2, \dots, M,$$

$$\frac{\partial^2 \theta_m(t, z, p)}{\partial z^2} = \Psi_m \left(k_{\alpha z} - \frac{\partial \theta_m(t, z, p)}{\partial z} \right)^3 \operatorname{Re} \left(E_\alpha(t - z / u_m, z) e^{i\theta_m(t, z, p)} \right).$$

Граничные условия для амплитуд поля и фаз пучков имеют вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(t, \Gamma_1) &= \mathbf{E}^0(t) + \mathbf{P}\mathbf{E}(t, \Gamma_2), \\ \frac{\partial \theta_m(t, \Gamma_1^m, p)}{\partial z} &= k_{mz}^0 - \omega / u_m, \quad \theta_m(t, \Gamma_1^m, p) = p. \end{aligned} \quad (10)$$

Матрица $\mathbf{P}$ может быть нулевой либо содержать амплитуды и фазы коэффициентов связи соответствующих волн при отражении.

Компоненты векторов Γ_1 и Γ_2 для волны с амплитудой E_j есть соответственно координаты «входа» и «выхода» этой волны в i -той секции (z_i^1 и z_i^2 либо наоборот в зависимости от направления распространения волн). Граничные условия для волн $\mathbf{E}$ содержат амплитуды внешних падающих на резонатор (при $z = 0$ и $z = L$) волн $\mathbf{E}^0$, которые могут быть равными либо отличными от 0, в том числе иметь некую форму во времени (например, Гаусса). Внутренние граничные условия перехода волн из одной секции в другую и условия связи, описывающие внешние зеркала, задаются вторым слагаемым правой части.

Γ_1^m равно 0 либо L в зависимости от того, с какой стороны резонатора пришел m -й электронный пучок – слева или справа. k_{mz}^0 соответствует проекции на ось z волнового вектора электромагнитной волны в первой секции влета пучка, находящейся в синхронизме с пучком.

Матрица $\mathbf{A}$ может быть единичной диагональной в отсутствие дисперсии в системе, либо иметь соответствующие члены a_{kj} , описывающие дисперсию. Матрица $\mathbf{B}$ является диагональной и содержит направляющие косинусы дифракции. Коэффициенты c_{kj} матрицы $\mathbf{C}$ описывают системные дифракционные параметры, в том числе коэффициенты разложения диэлектрической проницаемости среды в ряд по векторам обратной решетки, либо 0 для несвязанных между собой волн. Матрица $\mathbf{D}$ состоит из нулей и единиц, описывая связь между волнами и пучками.

Преобразуем (9) для объемной модели ОЛСЭ с учетом многоволновой геометрии и нескольких пучков заряженных частиц в матричном виде.

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{B} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial z} + \mathbf{H} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial z} + \mathbf{C}\mathbf{E} + \mathbf{G}\mathbf{E} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{D}\mathbf{F}, \quad (11)$$

где $\mathbf{H} = (\mathbf{A}^{-1} - \mathbf{I})\mathbf{B}$, $\mathbf{G} = (\mathbf{A}^{-1} - \mathbf{I})\mathbf{C}$, $\mathbf{I}$ – единичная матрица.

Здесь члены уравнения $\mathbf{B} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial z}$ и $\mathbf{C}\mathbf{E}$ описывают «чистую» дифракцию без дисперсии в системе. Члены $\mathbf{H} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial z}$ и $\mathbf{G}\mathbf{E}$ отвечают за дисперсию.

Также в **разделе 1.7** приведена система для случая двухпучкового двухволнового односекционного генератора ОЛСЭ в геометрии Брэгга.

Построенные в главе 1 математические модели ОЛСЭ (1D – с одной пространственной координатой z для ОЛСЭ в объемной геометрии, и 2D для ОЛСЭ с объемными дифракционными решетками) позволяют описать нелинейную стадию работы со сложной трехмерной динамикой различных типов объемных лазеров на свободных электронах во всех спектральных диапазонах и делают возможным экспресс-моделирование сложной трехмерной динамики электронного пучка и электромагнитных волн в ОЛСЭ.

В **главе 2** дается описание и исследование разработанных разностных схем для решения задач моделирования, сформулированных в главе 1.

В **разделе 2.2** исследуются различные разностные схемы для решения дифференциальных уравнений специального вида:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + a \frac{\partial u}{\partial z} + b \frac{\partial u}{\partial x} = f, \quad (12)$$

где коэффициент $a = a' + ia''$ является комплексным. Для простоты рассматривается случай $a' > 0$, $a'' > 0$, $b > 0$.

При моделировании ОЛСЭ с объемными дифракционными решетками (рисунок 2) система уравнений содержит чисто гиперболические уравнения для волн в областях II и IV. В области III коэффициент a является комплексным.

В результате в этом разделе построена и исследована разностная схема многокомпонентного метода переменных направлений (ММПН), справедливая при выполнении на введенных равномерных разностных сетках условия $8(a' / h_z + b / h_x) \geq a'' / h_z$:

$$\begin{aligned} y_t^1 + a \hat{y}_z^1 + b y_x^2 &= \hat{f}, \\ y_t^2 + a \hat{y}_z^1 + b \hat{y}_x^2 &= \hat{f}, \end{aligned} \quad (13)$$

где y^1 и y^2 – компоненты приближенного решения рассматриваемого уравнения. В качестве решения берется любая из этих компонент либо их полусумма.

Являясь методом полной аппроксимации, ММПН показал себя эффективным и устойчивым для многомерных задач в областях со сложной

геометрией. Он также оказался достаточно эффективным при работе с комплексной арифметикой. Кроме этого, он позволяет осуществлять параллельный счет.

Схема (13) может быть использована для моделирования как поверхностного ОЛСЭ с объемными дифракционными решетками, так и поверхностных электромагнитных волн и поверхностных плазмонов, включая моделирование наноЛСЭ.

В **разделе 2.3** на равномерных разностных сетках предлагается следующая разностная схема ММПН для моделирования обобщенной модели ОЛСЭ с дифракционными решетками, обеспечивающая распараллеливание по x :

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_t^1 + \mathbf{A} \mathbf{C}_A \hat{\mathbf{E}}_z^1 + \mathbf{B} \mathbf{C}_B \mathbf{E}_x^2 + \mathbf{Q} \hat{\mathbf{E}}^1 &= \hat{\mathbf{U}}(\mathbf{j}), \\ \mathbf{E}_t^2 + \mathbf{A} \mathbf{C}_A \hat{\mathbf{E}}_z^1 + \mathbf{B} \mathbf{C}_B \hat{\mathbf{E}}_x^2 + \mathbf{Q} \hat{\mathbf{E}}^1 &= \hat{\mathbf{U}}(\mathbf{j}), \\ \mathbf{A}^- \mathbf{E}_t^1 + \mathbf{B}^- \mathbf{C}_B \mathbf{E}_x^2 + \mathbf{C}^- \hat{\mathbf{E}}^1 + \mathbf{A}^+ \mathbf{E}_t^1 + \mathbf{B}^+ \mathbf{C}_B \mathbf{E}_x^2 + \mathbf{C}^+ \hat{\mathbf{E}}^1 &= \hat{\mathbf{G}}(\mathbf{j}), \\ \mathbf{A}^- \mathbf{E}_t^2 + \mathbf{B}^- \mathbf{C}_B \hat{\mathbf{E}}_x^2 + \mathbf{C}^- \hat{\mathbf{E}}^1 + \mathbf{A}^+ \mathbf{E}_t^1 + \mathbf{B}^+ \mathbf{C}_B \mathbf{E}_x^2 + \mathbf{C}^+ \hat{\mathbf{E}}^1 &= \hat{\mathbf{G}}(\mathbf{j}), \end{aligned} \quad (14)$$

где $\mathbf{E}^1$ и $\mathbf{E}^2$ — две компоненты приближенного решения для вектора амплитуд $\mathbf{E}$. Здесь введены общепринятые обозначения, а также $\tilde{E} = \frac{E_k + E_{k-1}}{2}$,

$$C_A E_z = C_A \frac{E_k^l - E_{k\pm 1}^l}{h_z}, \quad \mathbf{j} = \frac{\mathbf{j}^1 + \mathbf{j}^2}{2}. \quad C_A \mathbf{E}_z \text{ и } C_B \mathbf{E}_x \text{ означает, что следует выбирать}$$

соответствующую правую или левую конечно-разностную производную по z в зависимости от направления распространения волны. C_A и C_B являются диагональными матрицами с элементами «+1» или «-1», соответствующими левой и правой разностной производным для каждой амплитуды вектора $\mathbf{E}$. В правой части берется полусумма значений обоих компонент ММПН плотности тока пучка.

В **разделах 2.4 и 2.5** приведены разностные схемы, использованные для эффективного моделирования ОЛСЭ с объемным резонатором.

Раздел 2.6 содержит описание комплекса программ VOLC (*Volume Code*), предназначенного для экспресс-моделирования работы различных типов ОЛСЭ, в том числе экспериментальных физических установок ОЛСЭ НИИ ЯП БГУ. Комплекс состоит из 3 частей: подмодуль 1D (двух- и трехволновые геометрии, 1 пучок частиц), подмодуль 1D (двухволновые геометрии, 2 пучка заряженных частиц), подмодуль 2D.

VOLC — комплекс программ, позволяющий осуществить математическое моделирование во времени рассматриваемых физических процессов в ОЛСЭ

для одного (1D) и двух (2D) пространственных измерений. В первом случае мы имеем одно пространственное измерение для электромагнитных полей и два измерения (пространственное и фаза) для электронного пучка + время, используемое для моделирования различных геометрий. Второй случай касается ОЛСЭ с объемными дифракционными решетками с двумя пространственными измерениями (z и x) для электромагнитных полей и функций распределения пучка электронов для геометрии рисунка 2.

В результате аккуратного учета условий ОРОС и фаз электронов в пучке, 1D-код VOLC позволяет моделировать сложную трехмерную динамику электронного пучка и распространение электромагнитных волн в трехмерном резонаторе ОЛСЭ. Такая программа подходит для быстрого моделирования, не требуя больших мощностей компьютера. Она позволяет проверить все основные физические закономерности, лежащие в основе ОЛСЭ, провести быстрый предрасчет условий эксперимента, который затем может быть с большей точностью промоделирован с помощью «тяжелых» компьютерных программ на суперкомпьютерной технике.

В **главе 3** обсуждаются основные результаты численного моделирования с помощью комплекса программ VOLC. Здесь получены важные численные результаты, демонстрирующие различные стороны режимов усиления и генерации излучения в ОЛСЭ, проведена проверка выполнения основных закономерностей функционирования ОЛСЭ. Моделирование ОЛСЭ осуществлено в широком диапазоне параметров. Проведен детальный анализ правильности предложенных в данной диссертационной работе моделей и методов решения.

Глава начинается с обзора проблем валидации и верификации программного обеспечения, используемого для математического моделирования разнообразных физических проблем (**раздел 3.1**).

Раздел 3.2 посвящен полученным результатам моделирования точного условия динамической дифракции, прохождения пучка заряженных частиц через резонатор, порогам генерации, стационарному решению стандартной задачи дифракции с электронным пучком, чувствительности системы к изменению начальных данных, а также результатам моделирования экспериментальных установок ОЛСЭ.

С целью всестороннего тестирования, валидации и верификации комплекса программ VOLC было проведено сравнение численных результатов с результатами, полученными аналитически, в случае стационарного решения стандартной задачи дифракции в резонаторе и стационарного решения стандартной задачи дифракции с электронным пучком. Первое позволило

протестировать и верифицировать моделирование электромагнитных полей в системе, второе – моделирование движения электронов в системе.

Проверка прохождения пучка заряженных частиц через резонатор является важной составляющей процесса валидации и верификации комплекса программ. В качестве примера проведено сравнение результатов работы VOLC для полноценно работающего ОЛСЭ-генератора в геометрии Брэгга и при выключенной в системе дифракции, что означает движение пучка электронов в резонаторе без взаимодействия с электромагнитным полем. Во втором случае фаза электронов пучка, как и следовало ожидать, не изменяется, то есть электроны проходят резонатор без взаимодействия с электромагнитным полем и режим генерации не реализуется. Также проверена возможность моделирования пространственной формы пучка.

В разделе 3.2 также приводятся результаты моделирования прохождения пучка заряженных частиц через резонатор, исследуются пороги генерации (рисунок 3), чувствительность системы к изменению начальных данных.

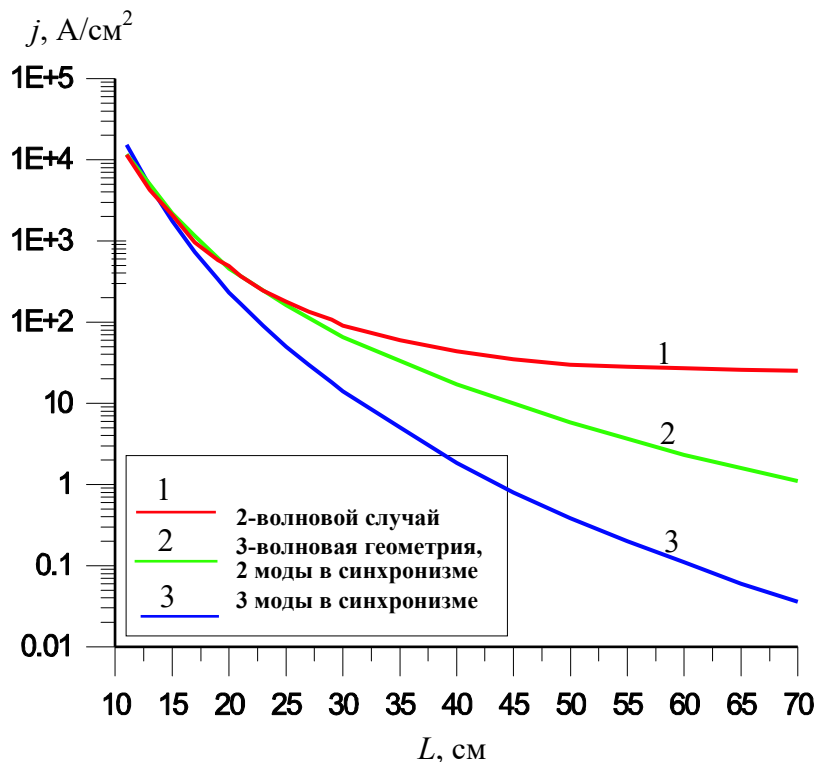


Рисунок 3 – Порог генерации по плотности тока в зависимости от длины мишени в геометрии Брэгга, сравнение зависимости порогового тока в двух- и трехволновом ОЛСЭ при наличии двух и трех мод в синхронизме

Далее обсуждаются результаты исследования возможности работы ОЛСЭ в режимах усиления и генерации в различных геометриях, моделирование ОЛСЭ с внешними зеркалами и многосекционного ОЛСЭ (разделы 3.3–3.5).

Проведенное сравнение одномерных и неодномерных геометрий ОЛСЭ (раздел 3.6) четко продемонстрировало, что с учетом ОРОС можно получить существенно **б**ольшие амплитуды поля по сравнению с одномерным случаем. Дополнительно в результате проведенных численных экспериментов показано, что комплекс программ VOLC позволяет моделировать генераторы и усилители в режимах ЛОВ и ЛБВ. Анализ учета дисперсии (раздел 3.7) говорит о том что, хотя характер решения сохраняется, дисперсию электромагнитных волн в системе учитывать необходимо, особенно при исследовании различных хаотических режимов работы ОЛСЭ.

Показано (раздел 3.8), что генерация ОЛСЭ в рентгеновском диапазоне может быть осуществлена на электронных пучках Международной коллаборации ускорительных машин DESY-TESLA.

В результате моделирования оптического ОЛСЭ с объемными дифракционными решетками выполнена оптимизация процесса усиления черенковской волны по отношению к условию синхронизма и условию Брэгга. Получено, что для видимой области спектра в выбранной геометрии дифракции насыщение черенковской волны достигается уже на длине мишени, равной 10 см. Это значит, что рассматриваемая схема ОЛСЭ характеризуется малой рабочей областью генерации и генерируемое излучение имеет узкую спектральную ширину.

В разделе 3.9 дан обзор результатов моделирования двухпучкового двухволнового ОЛСЭ, параметры которого приближены к реальным параметрам установки ОЛСЭ-250. Показано, что наличие двух пучков в системе позволяет существенно понизить пороговые значения токов в системе, а также является одним из механизмов контроля хаоса в системе.

В целом, применимость предложенных в данной работе разностных схем и достоверность решения методами математического моделирования сформулированных задач подтверждается использованием принятых в данной научной области исходных уравнений, корректностью использованных приближений, многочисленными положительными примерами валидации и верификации разработанного программного обеспечения – комплекса программ VOLC, реализующего предложенные в работе разностные схемы решения. Также достоверность полученных результатов подтверждается их соответствием современным физическим представлениям и согласованностью с существующими аналитическими оценками.

Глава 4 представляет результаты исследования хаотической динамики в различных типах ОЛСЭ. Здесь впервые продемонстрировано, что ОЛСЭ является хаотической динамической системой. Методами математического моделирования исследованы различные стороны хаотической динамики

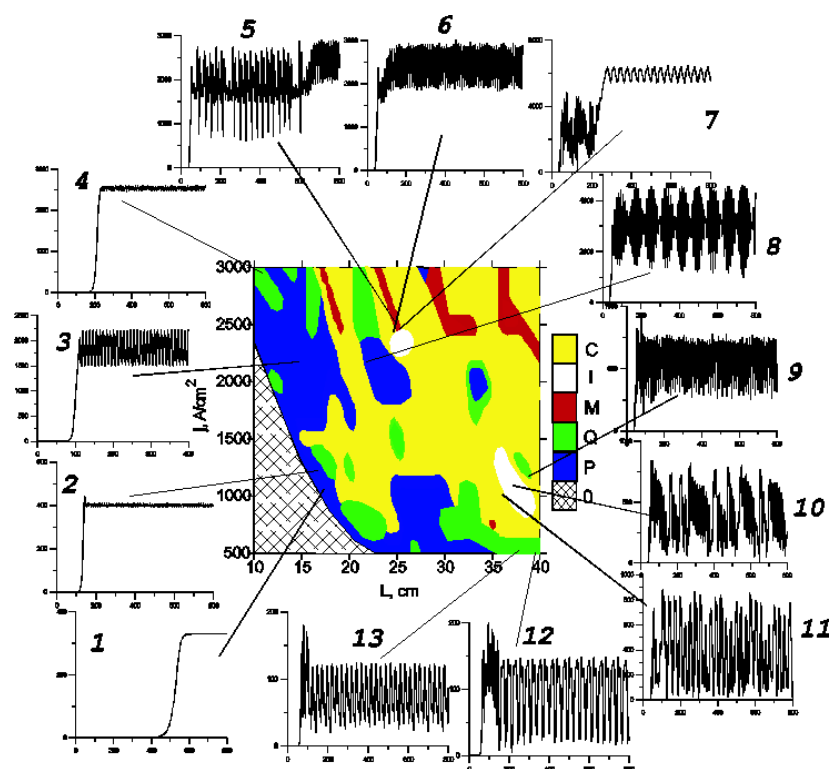
ОЛСЭ, в том числе в случае режима усиления, режима генерации и др. При численном решении систем уравнений всегда возникает вопрос, является ли наблюдаемый «хаос» хаосом на самом деле либо результатом некорректного учета ошибок округления или конечного порядка аппроксимации дифференциальных уравнений разностными. Одним из ответов является исследование чувствительности решений к малым возмущениям начальных данных. Если неустойчивость решений наблюдается именно для хаотических режимов, а для периодических и квазипериодических решение устойчиво, то это является хорошей проверкой используемых разностных схем и программных средств. В главе 4 такое исследование проведено. Здесь приводятся результаты исследования хаоса в режиме генерации (раздел 4.2), устойчивости по начальным данным и показатели Ляпунова (раздел 4.3), хаоса в режиме усиления (раздел 4.4), динамики поля и пучка частиц (раздел 4.5).

В разделе 4.6 представлена галерея различных хаотических режимов и десять пар различных параметрических карт перехода к хаосу (см. пример таких карт на рисунке 4). Графики по краям параметрических карт иллюстрируют наиболее характерные примеры различных динамических режимов. На оси абсцисс на данных графиках представлено время в нс, на оси ординат – модуль амплитуды полей на выходе из резонатора в статВ/см.

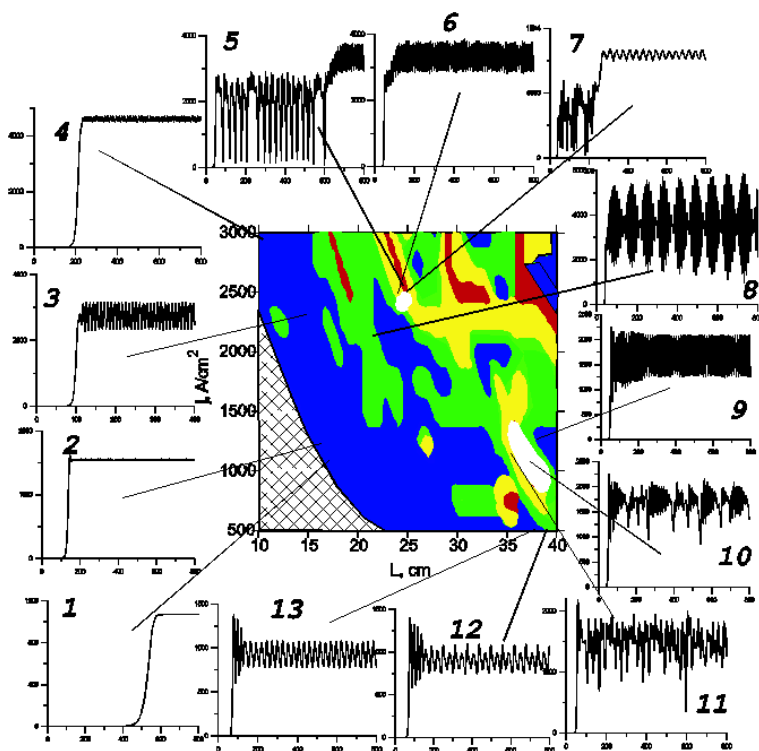
Также представлены и проанализированы результаты моделирование фольгового резонатора (раздел 4.7), контроль и способы управления хаосом в ОЛСЭ (раздел 4.8), подавление паразитных частот в ОЛСЭ (раздел 4.9), хаос в двухволновом двухпучковом ОЛСЭ (раздел 4.10).

На основе приведенных в главе 4 численных результатов показано, что изменение геометрии неоднородной дифракции ведет к изменению типа динамического хаотического решения и выбором геометрии ОЛСЭ можно реализовать периодическую динамику вместо хаотической. Также методами математического моделирования продемонстрировано одно из основных физических свойств ОЛСЭ – подавление паразитных мод в системе вследствие ОРОС и динамической дифракции. Показано, что неоднородная геометрия дифракции представляет сложную картину переходов между различными хаотическими динамическими режимами, а также что специальным выбором параметров геометрии можно получить **большие** значения амплитуд полей при генерации ОЛСЭ по сравнению с одномерной геометрией и принципиально другой тип решения.

Дополнительно рассмотрено влияние внешних сигналов на характер решения в ОЛСЭ. Продemonстрировано, что выбор параметров внешних сигналов может привести к **большим** значениям амплитуд полей, а также принципиально другому типу решения.



a



б

0 – плотность тока ниже порога. P – периодические режимы, Q – квазипериодичность, C – хаос, I – перемежаемость, M – переход между высокоамплитудными и низкоамплитудными режимами

Рисунок 4 – Параметрическая карта перехода к хаосу (j , L) для проходящей (а) и дифрагированной (б) волн

Глава 5 посвящена созданной информационной платформе для популяризации и сохранения научных знаний, состоящей из системы управления контентом научно-образовательного интернет-портала eLab-Science и созданных на ее основе порталов научных знаний, в том числе портала ядерных знаний BelNET. Она основана на следующих современных концепциях информационных технологий – свободном программном обеспечении, системном процессном подходе, семантических технологиях и менеджменте (управлении) научными знаниями. В главе дается описание особенностей фреймворка eLab на основе свободного программного обеспечения (**раздел 5.2**), истории его развития (**раздел 5.3**), системном процессном подходе (**раздел 5.4**) и предложенных в рамках работ семантических технологиях (**раздел 5.5**).

Ядерные знания включают широкий спектр научных и практических знаний в таких областях как физика элементарных частиц, ядерная физика, атомная и молекулярная физика, физика конденсированных сред, ядерные материалы, инженерные и измерительные, приборы атомная энергетика, науки о жизни и Земле, термоядерные исследования и технологии, химия, ядерный топливный цикл и радиоактивные отходы, экономика, право, социум и др.

В результате проведенных работ на основе фреймворка eLab развита оригинальная белорусская система управления контентом eLab-Science для создания научно-образовательных порталов различных профилей (**раздел 5.6**). На ее основе специализированный электронный портал ядерных знаний BelNET (*Belarusian Nuclear Education and Training Portal*) создан и размещен по адресу: <https://belnet.bsu.by>, а с июля 2023 года – еще и по адресам <https://belnet.by/> и <https://net.inpnet.net/> (**раздел 5.7**). Также система eLab-Science использована для других научных порталов.

Портал ядерных знаний BelNET постоянно развивается и бесперебойно функционирует с 2016 г. Специально для него разработаны оригинальные материалы в области ОЛСЭ. Они размещены в разделе Наука → Объемные лазеры на свободных электронах <https://belnet.by/elib/?i=184>, а также: Учебные курсы → Лекции → Нелинейная динамика излучения. Здесь размещен онлайн курс лекций «Нелинейная динамика излучения пучков заряженных частиц в пространственно-периодических структурах», состоящий из 5 лекций.

В настоящий момент раздел, посвященный ОЛСЭ, содержит 225 записей – статей, презентаций, препринтов, авторефератов диссертаций. Его подраздел «Математическое моделирование ОЛСЭ» <https://belnet.by/elib/?i=310> содержит 60 записей. Данные разделы продолжают расширяться.

На портале BelNET планируется разместить репозиторий, содержащий в свободном доступе программы для моделирования ОЛСЭ, а также для расчетов его отдельных параметров.

В результате создан информационный инструментарий для различных целей, включая разработку системы управления контентом образовательного и научного интернет-портала, интеллектуальной информационной системы в области ядерной и радиационной безопасности и т. д. Продемонстрировано, что созданное программное обеспечение может быть использовано для решения разнообразных задач из разных сфер деятельности и различных отраслей знаний. В целом, созданная система управления контентом портала обеспечивает удобное использование полученных в рамках работы научных результатов по математическому моделированию ОЛСЭ в образовательных целях. В результате внедрения семантических технологий на белорусском портале BelNET создается база знаний в области ядерных знаний – база ядерных знаний. Проведенные работы по созданию и развитию портала ядерных знаний BelNET в Республике Беларусь свидетельствуют о формировании в стране системы современных ядерных знаний (**раздел 5.8**).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Впервые построены обобщенные системы интегро-дифференциальных уравнений, описывающие различные варианты многоволновых ОЛСЭ, в том числе поверхностных и многопучковых, учитывающие многосекционные резонаторы, дисперсию электромагнитных волн в системе, наружные зеркала, и т. д. Использован метод усреднения по фазам влета релятивистских электронов в область взаимодействия – не только по моменту, но и по поперечной координате влета электронов в область взаимодействия, что позволило адекватно промоделировать динамику широкого в поперечном сечении пучка [6–А, 7–А, 8–А, 9–А, 10–А, 11–А, 12–А, 18–А, 19–А, 21–А, 29–А, 31–А, 33–А, 39–А, 52–А, 84–А, 91–А, 105–А, 110–А].

2. Разработаны разностные схемы для их решения, позволяющие проводить параллельные вычисления. Они могут эффективно применяться при моделировании различных многомерных многоволновых объемных и поверхностных геометрий ОЛСЭ, а также поверхностных электромагнитных волн, поверхностных плазмонов и наноОЛСЭ [2–А, 3–А, 4–А, 5–А, 6–А, 7–А, 10–А, 11–А, 31–А, 33–А, 40–А, 47–А, 61–А, 79–А].

3. Разработан комплекс программ VOLC, предназначенный для экспресс-моделирования работы различных типов ОЛСЭ, в том числе экспериментальных физических установок ОЛСЭ НИИ ЯП БГУ. VOLC позволяет моделировать сложную трехмерную динамику электронного пучка и распространение электромагнитных волн в ОЛСЭ. Комплекс программ

всесторонне протестирован, в том числе путем сравнения численных результатов моделирования и известных аналитических решений [11–А, 14–А, 28–А, 31–А, 32–А, 33–А, 41–А, 43–А, 44–А, 61–А, 80–А, 103–А, 104–А].

4. Проведенное математическое моделирование процессов генерации и усиления электромагнитного излучения в различных геометриях и типах ОЛСЭ в диапазоне спектра от рентгеновского до миллиметрового и широкого набора параметров подтвердило все основные физические закономерности и принципы работы ОЛСЭ. Проведено моделирование экспериментальных установок ОЛСЭ НИИ ЯП БГУ, в том числе для них получены пороги генерации. Полученные численные результаты имеют хорошее согласие с теоретическими и экспериментальными физическими результатами [8–А, 9–А, 10–А, 11–А, 31–А, 32–А, 33–А, 41–А, 43–А, 46–А, 48–А, 61–А, 76–А, 94–А, 108–А].

5. Показано, что для эффективной генерации существует оптимальный набор параметров системы и при их изменении можно получить существенно большие значения амплитуд электромагнитного поля и принципиально другие режимы работы [7–А, 8–А, 17–А, 19–А, 20–А, 29–А, 39–А, 40–А, 41–А, 46–А, 52–А, 61–А, 87–А, 107–А].

6. Впервые показано, что ОЛСЭ является динамической хаотической системой с особенностями нелинейной динамики генерации, обусловленными нелокальной природой взаимодействия пучка электронов с электромагнитным полем в условиях дифракции. В процессе изучения хаотической природы ОЛСЭ методами математического моделирования исследованы пространственно-временная и фазовая динамика ОЛСЭ, промоделированы различные динамические режимы работы со сложной их трансформацией. Предложены методы управления частотными режимами (хаосом) в ОЛСЭ за счет изменения параметров системы и использования внешних сигналов [8–А, 9–А, 10–А, 11–А, 12–А, 13–А, 14–А, 15–А, 16–А, 17–А, 19–А, 20–А, 42–А, 45–А, 47–А, 77–А, 81–А, 83–А].

7. Проведенное исследование основных свойств ОЛСЭ как хаотической динамической системы важно для будущих исследований с целью повышения эффективности генераторов и источников когерентного излучения в разных частотных диапазонах, реализации в экспериментальных исследованиях контроля и способов управления хаосом, а также выбора оптимальных режимов работы ОЛСЭ [16–А, 17–А, 18–А, 19–А, 20–А, 21–А, 23–А, 32–А, 42–А, 45–А, 48–А, 61–А, 78–А, 79–А, 82–А, 86–А, 95–А].

8. Разработана оригинальная белорусская система управления контентом eLab-Science для создания научно-образовательных порталов различных профилей на основе свободного программного обеспечения с использованием принципов системного процессного подхода и семантических технологий в

рамках фреймворка eLab. Продемонстрировано, что созданное программное обеспечение может быть использовано для решения разнообразных задач из разных сфер деятельности и различных отраслей знаний. На основе eLab-Science создан специализированный электронный научно-образовательный портал ядерных знаний BelNET. Специально разработаны оригинальные материалы для контента портала BelNET, посвященные объемным лазерам на свободных электронах, необходимые, в том числе, для образовательных целей. Создается система управления ядерными знаниями в Республике Беларусь, основой которой является портал BelNET [1–А, 22–А, 24–А, 25–А, 26–А, 27–А, 30–А, 34–А, 35–А, 36–А, 37–А, 38–А, 49–А, 50–А, 51–А, 53–А, 54–А, 55–А, 56–А, 57–А, 58–А, 59–А, 60–А, 62–А, 63–А, 64–А, 65–А, 66–А, 67–А, 68–А, 69–А, 70–А, 71–А, 72–А, 73–А, 74–А, 75–А, 85–А, 88–А, 89–А, 90–А, 92–А, 93–А, 96–А, 97–А, 98–А, 99–А, 100–А, 101–А, 102–А, 106–А, 109–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты работы могут быть использованы для разработки мощных источников электромагнитного излучения разных частотных диапазонов с целью их применения для физики высоких энергий, исследований плазмы и решения проблемы термоядерного синтеза и других областях науки и техники.

Предложенные разностные схемы могут быть использованы для математического моделирования не только ОЛСЭ, но и различных типов электронных усилителей и генераторов, например, ЛОВ, ЛБВ, фотонных и наноЛСЭ, а также различных устройств, использующих поверхностные электромагнитные волны и поверхностные плазмоны.

Результаты работы, включая разработанный комплекс программ VOLC, могут быть использованы для математического моделирования и обработки результатов будущих экспериментов по ОЛСЭ в коллаборации ОИЯИ FLAP.

Результаты работы в части создания и обеспечения бесперебойного функционирования электронного портала ядерных знаний BelNET могут быть использованы в учебном процессе учреждений образования республики, готовящих специалистов в области ядерной физики, в том числе для ядерной энергетики РБ, а также для информирования населения и учащихся системы высшего и среднего образования по вопросам ядерной энергетики и радиационной безопасности, с целью повышения грамотности населения и интернет-культуры молодого поколения.

Создание специализированной информационной архивной онлайн-системы управления научными знаниями в рамках портала BelNET важно для свободного размещения препринтов и статей на русском языке в первую очередь в области ядерных знаний, а также в широком диапазоне физики, математики, информатики, других естественных наук и техники.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Монографии

1—А. Сытова, С.Н. Информационная система eLab в науке, практике, образовании: монография / С.Н. Сытова; БГУ. — Мн., 2021. — 202 с.

Статьи в научных изданиях в соответствии с п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий

2—A. Sytova, S. Multicomponent Iterative Method for Solving Two-Dimensional Heat Transfer Equation on Moving Grids / S. Sytova // Mathematical Modelling and Analysis. — 2000. — Vol. 5. — P. 164–174.

3—А. Сытова, С.Н. Разностные методы в задачах моделирования объемных лазеров на свободных электронах / С.Н. Сытова // Дифференц. уравнения. — 2001. — Т. 37, № 7. — С. 976–981.

4—A. Sytova, S. On Numerical Methods for One Problem of Mixed Type / S. Sytova // Mathematical Modelling and Analysis. — 2001. — Vol. 6, № 2. — P. 321–326.

5—А. Сытова, С.Н. Разностные методы решения обобщенных уравнений переноса / С.Н. Сытова // Дифференциальные уравнения. — 2002. — Т. 38, № 7. — P. 999–1000.

6—A. Batrakov, K. Modelling of quasi-Cherenkov electron beam instability in periodical structures / K. Batrakov, S. Sytova // Mathematical Modelling and Analysis. — 2004. — Vol. 9, № 1. — P. 1–8.

7—A. Batrakov, K.G. Nonlinear Analysis of Quasi-Cherenkov Electromagnetic Beam Instability in VFEL (Volume Free Electron Laser) / K.G. Batrakov, S.N. Sytova // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. — 2005. — Vol. 8, № 1. — P. 42–48.

8—A. Batrakov, K.G. Dynamics of Electron Beam Instabilities under Conditions of Multiwave Distributed Feedback / K.G. Batrakov, S.N. Sytova // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. — 2005. — Vol. 8, № 4. — P. 359–365.

9—A. Batrakov, K. Nonstationary stage of quasi-Cherenkov beam instability in periodical structure / K. Batrakov, S. Sytova // Mathematical modelling and analysis. — 2005. — Vol. 10, № 1. — P. 1–8.

10—А. Батраков, К.Г. Моделирование объемных лазеров на свободных электронах / К.Г. Батраков, С.Н. Сытова // Журнал выч. математики и мат. физики. — 2005. — Т. 45, № 4. — С. 690–700.

11—A. Batrakov, K. Mathematical Modeling of Multiwave Volume Free Electron Laser: Basic Principles and Numerical Experiments / K. Batrakov, S. Sytova // Mathematical Modelling and Analysis. — 2006. — Vol. 11, № 1. — P. 13–22.

12—А. Sytova, S. Volume Free Electron Laser (VFEL) as a Dynamical System / S. Sytova // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2007. – Vol. 10, № 3. – P. 297–302.

13—А. Сытова, С.Н. Динамика генерации объемных лазеров на свободных электронах / С.Н. Сытова // Вестник БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. – 2008. – № 3. – С. 29–34.

14—А. Sytova, S. Numerical Analysis of Lasing Dynamics in Volume Free Electron Laser / S. Sytova // Mathematical Modelling and Analysis. – 2008. – Vol. 13, № 2. – P. 263–273.

15—А. Sytova, S.N. Some Aspects of Chaotic Lasing in Volume Free Electron Lasers / S.N. Sytova // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2009. – Vol. 12, № 1. – P. 37–45.

16—А. Сытова, С.Н. Хаос в объемных лазерах на свободных электронах / С.Н. Сытова // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2011. – Т. 19, № 2. – С. 93–111.

17—А. Sytova, S.N. Comparison of One-Dimensional and Volume Distributed Feedback in Microwave Vacuum Electronic Devices / S.N. Sytova // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2012. – Vol. 15, № 4. – P. 379–386.

18—А. Сытова, С.Н. Модели объемных лазеров на свободных электронах / С.Н. Сытова // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2012. – Т. 20, № 6. – С. 124–135.

19—А. Барышевский, В.Г. Радиационные процессы, радиационная неустойчивость и хаос в излучении, образованном релятивистскими пучками, движущимися в трехмерных (двумерных) пространственно-периодических структурах (естественных и фотонных кристаллах) / В.Г. Барышевский, С.Н. Сытова // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2013. – Т. 21, № 6. – С. 25–48.

20—А. Сытова, С.Н. Влияние внешних условий на хаос в объемных лазерах на свободных электронах / С.Н. Сытова // Доклады НАН Беларуси. – 2014. – Т. 58, № 1. – С. 47–52.

21—А. Sytova, S.N. Methods of Chaos Control in Radiation of Charged Particles Moving in Non-One-Dimensional Periodical Structures / S.N. Sytova // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2017. – Vol. 20, № 2. – P. 21–29.

22—А. Информационная система eLab для аккредитованных испытательных лабораторий / С.Н. Сытова, А.П. Дунец, А.Н. Коваленко, А.Л. Мазаник, Т.П. Сидорович, С.В. Черепица // Информатика. – 2017. – № 3. – С. 49–61.

23—А. Сытова, С.Н. Нелинейная динамика излучения сильноточных пучков заряженных частиц в пространственно-периодических структурах

/ С.Н. Сытова // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2021. – № 1. – С. 62–72.

24–А. Информационная система учета и контроля ядерного материала / С.Н. Сытова, А.П. Дунец, А.Н. Коваленко, С.В. Черепица // Доклады БГУИР. – 2021. – Т. 19, № 4. – С. 94–102.

25–А. Sytova, S. Belarusian software for nuclear knowledge management / S. Sytova // Nuclear Physics and Atomic Energy. – 2021. – Vol. 22, № 1. – P. 104–110.

26–А. Belarusian software for nuclear material accounting at the level of the regulatory body / S.N. Sytova, A.P. Dunets, A.N. Kavalenka, S.V. Charapitsa // Nuclear Physics and Atomic Energy. – 2021. – Vol. 22, № 4. – P. 400–408.

27–А. Сытова, С.Н. Система управления ядерными знаниями в Республике Беларусь / С.Н. Сытова // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2022. – № 2. – С. 87–98.

28–А. Sytova, S. Simulation Techniques for Vacuum Electronic Devices / S. Sytova // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2022. – Vol. 25, № 2. – P. 168–176.

29–А. Sytova, S. Nonlinear Dynamics of Radiation in Multiple-Beam Vacuum Electronic Devices / S. Sytova // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2022. – Vol. 25, № 4. – P. 359–367.

30–А. Основы функционирования семантического портала ядерных знаний BelNET / С.Н. Сытова, В.В. Гавриловец, А.П. Дунец, А.Н. Коваленко, С.В. Черепица // Информатика. – 2024. – Т. 21, № 2. – С. 7–23.

Статьи в других научных изданиях

31–А. Сытова, С.Н. Численные методы в моделировании объемных лазеров на свободных электронах / С.Н. Сытова // Фундаментальные и прикладные физические исследования 1986–2001 гг. / Бел. гос. ун-т; под ред. В.Г. Барышевского. – Минск, 2001. – С. 212–225.

32–А. Сытова, С.Н. Первые шаги в исследовании хаотической динамики объемных лазеров на свободных электронах / С.Н. Сытова // Фундаментальные и прикладные физические исследования 2002–2009 гг. / Бел. гос. ун-т; под ред. В.Г. Барышевского. – Минск, 2009. – С. 270–280.

33–А. Сытова, С.Н. Численные методы в моделировании нелинейной динамики процессов излучения, образуемого сильноточными пучками заряженных частиц в неоднородных пространственно-периодических структурах / С.Н. Сытова // Фундаментальные и прикладные физические исследования 2010–2016 гг. / Бел. гос. ун-т; под ред. С.А. Максименко. – Минск, 2016. – С. 80–91.

34–А. Фреймворк eLab для широкого круга приложений / С.Н. Сытова, С.В. Черепица, А.Л. Мазаник, А.Н. Коваленко // Фундаментальные и прикладные физические исследования 2010–2016 гг. / Бел. гос. ун-т; под ред. С.А. Максименко. – Минск, 2016. – С. 388–399.

35–А. Принципы формирования контента учебно-научного портала ядерных знаний BelNET / С.Н. Сытова, М.Д. Дежурко, И.Я. Дубовская, И.М. Кимленко, А.Н. Коваленко, А.С. Лобко, А.Л. Мазаник, Н.И. Поляк, Т.А. Савицкая, Т.П. Сидорович, А.И. Тимощенко, С.В. Черепица // Фундаментальные и прикладные физические исследования 2010–2016 гг. / Бел. гос. ун-т; под ред. С.А. Максименко. – Минск, 2016. – С. 400–417.

36–А. Контент учебно-научного портала ядерных знаний BelNET / С.Н. Сытова, А.Н. Коваленко, А.С. Лобко, А.Л. Мазаник, С.В. Черепица, М.Д. Дежурко, И.Я. Дубовская, Н.И. Поляк, А.И. Тимощенко, И.М. Кимленко, Т.А. Савицкая, Т.П. Сидорович // Вышэйшая школа. – 2016. – № 5. – С. 22–27.

37–А. Белорусское программное обеспечение для автоматизации процессов контроля (надзора) в области ядерной и радиационной безопасности / С.Н. Сытова, А.П. Дунец, А.Н. Коваленко, А.Л. Мазаник, Т.П. Сидорович, С.В. Черепица // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2017. – Т. 1, № 3. – С. 260–270.

38–А. Сытова, С.Н. Национальная система управления ядерными знаниями / С.Н. Сытова // Наука и инновации. – 2024. – № 2 (252). – С. 46–49.

Статьи в сборниках материалов конференций

39–А. Batrakov, K. Generation regimes of FEL with volume distributed feedback / K. Batrakov, S. Sytova // Proc. of the 28th Intern. Free Electron Laser Conference FEL2006, Berlin, Germany, Aug 27 – Sep. 1, 2006. – Berlin, Germany. – P. 41–44.

40–А. Batrakov, K. Numerical Simulation of Nonlinear Effects in Volume Free Electron Laser (VFEL) / K. Batrakov, S. Sytova // XXth Russian Conference on Charged Particle Accelerators, Novosibirsk, Russia, Sept. 10–14, 2006. – Novosibirsk, 2007. – P. 141–143.

41–А. Generation of Radiation in Volume Free Electron Lasers and Problems of Mathematical Modelling of Nonlinear Processes in Such Generators / V.G. Baryshevsky, K.G. Batrakov, V.I. Stolyarsky, S.N. Sytova // Actual Problems of Microworld Physics: proc. of the Int. School-Seminar, Gomel, Belarus, July 25 – Aug. 5, 2005 / Joint Int-t for Nuclear Research, Dubna, National Center for Particle and High Energy Physics of the Belarus. St. Un., B. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Inst. of Mechanics of Metal

Polymer Systems of the National Academy of Sciences of Belarus, F. Skorina Gomel State Univ., P. Sukhoi Gomel Technical Univ.; ed. by V. Mossolov. – Dubna, 2007. – P. 135–149.

42–A. Sytova, S.N. Chaotic Dynamics in Volume Free Electron Laser (VFEL) / S.N. Sytova // Nonlinear Dynamics – 2007 : proc. of the Second Internat. Conf., dedicated to the 150th Anniversary of A.M. Lyapunov, Kharkov, Ukraine, September 25–28, 2007 / Ministry of Science and Education of Ukraine, National Technical University “Kharkov Polytechnical Inst.”. – Kharkov, 2007. – P. 299–305.

43–A. Sytova, S. VOLC: Volume Free Electron Laser Simulation Code / S. Sytova // FEL-2007: proc. of the 29th Int. Free Electron Laser Conf., Novosibirsk, Aug. 26–31 2007 / Budker Inst. of Nuclear Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Science. – Novosibirsk, 2007. – P. 14–17.

44–A. Simulation of the PXR and CBS Spectra Radiated by Non-Relativistic Electrons in Thin Crystals / K.G. Batrakov, I.D. Feranchuk, O.M. Lugovskaya, S.N. Sytova // Proc. of SPIE. – 2007. – Vol. 6634: Internat. Conf. on Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena II, Frascati, Rome, Italy, July 3–7 2006. – P. 663412-1-12.

45–A. Sytova, S. Bifurcations and Chaos in Relativistic Beams Interacting with Three-Dimensional Periodical Structures / S. Sytova // Actual Problems of Microworld Physics : proc. of the Int. School-Seminar, Gomel, Belarus, July 23 – Aug. 3, 2007 / Joint In-t for Nuclear Research, Dubna, National Center for Particle and High Energy Physics of the Belarus. St. Un., B. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Inst. of Mechanics of Metal Polymer Systems of the National Academy of Sciences of Belarus, F. Skorina Gomel State University, P. Sukhoi Gomel Technical Univ. – Dubna, 2008. – Vol. 1. – P. 246–256.

46–A. Sytova, S. Some Features in Simulation of Relativistic Beam Passing Through Photonic Crystals / S. Sytova // Actual Problems of Microworld Physics : proc. of the Int. School-Seminar, Gomel, Belarus, July 15–26, 2009 / Joint In-t for Nuclear Research, Dubna, National Center for Particle and High Energy Physics of the Belarus. St. Un., B. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Inst. of Mechanics of Metal Polymer Systems of the National Academy of Sciences of Belarus, F. Skorina Gomel State Univ., P. Sukhoi Gomel Technical Univ. – Dubna, 2011. – Vol. 2. – P. 123–131.

47–А. Сытова, С.Н. Анализ динамических режимов генерации объемных лазеров на свободных электронах / С.Н. Сытова // Аналитические методы анализа и дифференциальных уравнений : труды 6-й междунар. конф., Минск,

12–17 сентября 2011 г. / Институт математики НАН Беларуси. – Минск, 2012. – Т. 2: Дифференциальные уравнения. – С. 125–129.

48–А. Sytova, S. Features of Volume Free Electron Laser Nonlinear Dynamics / S. Sytova // Actual Problems of Microworld Physics : proc. of the Int. School-Seminar, Gomel, Belarus, August 1–12, 2011 / Joint In-t for Nuclear Research, Dubna, National Center for Particle and High Energy Physics of the Belarus. St. Un., B. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Inst. of Mechanics of Metal Polymer Systems of the National Academy of Sciences of Belarus, F. Skorina Gomel State Univ., P. Sukhoi Gomel Technical Univ. – Dubna, 2013. – P. 220–229.

49–А. Сытова, С.Н. Возможность использования системы электронного документооборота «Е-Lab» для создания учебно-научного портала ядерных знаний / С.Н. Сытова, С.В. Черепица, А.С. Лобко // Международный конгресс по информатике : информационные системы и технологии : материалы Междунар. науч. конгр., Минск, 4-7 ноября 2013 г. / БГУ; редкол.: С.В. Абламейко (отв. ред.), В.В. Казаченок (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2013. – С. 254–259.

50–А. Sytova, S. Taxonomy of Belarusian Educational and Research Portal of Nuclear Knowledge / S. Sytova, A. Lobko, S. Charapitsa // Actual Problems of Microworld Physics : proc. of the XII Int. School-Seminar, Gomel, Belarus, July 22 – August 2, 2013 / Joint In-t for Nuclear Research, Dubna, National Center for Particle and High Energy Physics of the Belarus. St. Un., B. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel Branch of the National Academy of Sciences of Belarus, F. Skorina Gomel State Univ., P. Sukhoi Gomel State Technical Univ. – Dubna, 2015. – Vol. 2. – P. 212–220.

51–А. Steps in Creation of Educational and Research Web-Portal of Nuclear Knowledge BelNET [Electronic resource] / S. Charapitsa, I. Dubovskaya, I. Kimlenko, A. Kovalenko, A. Lobko, A. Mazanik, N. Polyak, T. Savitskaya, T. Sidorovich, S. Sytova, A. Timoschenko // Actual Problems of Microworld Physics : proc. of XIII Int. School-Seminar, Gomel, Belarus, July 27 – Aug. 7 2015 / Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Institute for Nuclear Problems of Belarusian State Univ., B. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel Branch of the National Academy of Sciences of Belarus, F. Skorina Gomel State University, Sukhoi State Technical University of Gomel ; eds. : V. Andreev [et al.]. – Mode of access : <https://arxiv.org/pdf/1512.04313.pdf>. – Date of access : 12.04/2024.

52–А. Сытова, С.Н. Взаимодействие нескольких релятивистских электронных пучков с электромагнитным полем в многоволновых объемных лазерах на свободных электронах / С.Н. Сытова // Проблемы физики

фундаментальных взаимодействий – теория, феноменология, эксперимент (ProFI-2015): труды. Междунар. семинара, Гомель, 19–20 нояб. 2015 г. / ГГТУ им. П.О. Сухого. – Гомель, 2015. – С. 130–140.

53–А. Information Technology in the Field of Nuclear and Radiation Safety / S. Sytova, S. Charapitsa, A. Kovalenko, A. Mazanik, T. Sidorovich // Nonlinear Dynamics and Applications. – Minsk, 2016. – Vol. 22: proc. of the Twenty-third Annual Seminar NPC'S'2016, Minsk, May 24–27, 2016 / Объед. ин-т энергетич. и ядер. исслед.; редкол.: В.И. Кувшинов [и др.]. – Р. 258–264.

54–А. Система дистанционного обучения в рамках учебно-научного портала ядерных знаний BelNET [Электронный ресурс] / С.Н. Сытова, М.Д. Дежурко, И.Я. Дубовская, И.М. Кимленко, А.Н. Коваленко, А.С. Лобко, А.Л. Мазаник, Н.И. Поляк, Т.А. Савицкая, Т.П. Сидорович, А.И. Тимощенко, С.В. Черепица // Международный конгресс по информатике: информационные системы и технологии CSIST'2016 : материалы Междунар. науч. конгр., Минск, 24–27 окт. 2016 г. / БГУ; редкол.: С.В. Абламейко (гл. ред.) [и др.] – Минск, 2016. – С. 737–742. – Режим доступа: https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/160489/1/%D0%A1%D1%8B%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%B0_%D0%94%D0%B5%D0%B6%D1%83%D1%80%D0%BA%D0%BE_%D0%94%D1%83%D0%B1%D0%BE%D0%B2%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D0%9A%D0%B8%D0%BC%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE.pdf. – Дата доступа: 09.04.2024.

55–А. Белорусское программное обеспечение для автоматизации систем учета и контроля в Вооруженных Силах Республики Беларусь / С.Н. Сытова, А.П. Дунец, А.Н. Коваленко, А.Л. Мазаник, Т.П. Сидорович, С.В. Черепица, А.А. Семашко, Г.Г. Дегтерюк // 7-я Международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения, Минск, 20–22 мая 2017 г.: сб. науч. ст. В 3 ч. / Гос. воен.-промышл. комитет Респ. Бел. – Минск, 2017. – Ч. 1. – С. 187–195.

56–А. Интеллектуальная информационная система eLab для обеспечения контроля (надзора) в области ядерной и радиационной безопасности / С.Н. Сытова, А.П. Дунец, А.Н. Коваленко, А.Л. Мазаник, Т.П. Сидорович, С.В. Черепица // Экологическая и радиационная безопасность объектов атомной энергетики : материалы докладов IV науч.-практич. конф. с международным участием, Калининград, 18–19 октября 2017 г. / Институт Балтийского моря, АО «Концерн Росэнергоатом», ИЦАЭ ; редкол.: М.И. Орлова (гл. ред.) [и др.]. – Калининград, 2017. – С. 71–78.

57—A. Knowledge presentation in the content management system eLab-Science / S.N. Sytova, A.P. Dunets, A.N. Kavalenka, A.L. Mazanik, T.P. Sidorovich, S.V. Charapitsa // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 15–17 февраля 2018 г. / Мин. обр. Респ. Бел., УО «Бел. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники» ; редкол. : В.В. Голенков (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2018. – P. 365–368.

58—A. Sytova, S. Information tool for multifarious scientific and practical research / S. Sytova // Engineering of Scintillation Materials and Radiation Technologies: selected articles of ISMART2018, Минск, 9–12 окт. 2018 г. / Ed.: M. Korzhik, A. Gektin. – Springer Proceedings in Physics, 2019. – Vol. 227, chap. 21. – P. 281–292.

59—А. Модуль учета и контроля ядерных материалов, радиоактивных отходов и отработавшего ядерного материала / С.Н. Сытова, А.П. Дунец, А.Н. Коваленко, А.А. Мазаник, С.В. Черепица // Информационные технологии в промышленности, логистике и социальной сфере. IT*2019: тез. докл. X Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 23–24 мая 2019 г. / НАН Беларуси, ОИПИ НАН Беларуси, Мин. пром. Респ. Бел., Мин. обр. Респ. Бел., БНТУ, БГУ, БГУИР. – Минск, 2019. – С. 203–206.

60—A. Original belarusian information system for regulatory authority in the field of nuclear and radiation safety under the IAEA supervision / S. Sytova, A. Dunets, A. Kavalenka, S. Charapitsa // Nonlinear Dynamics and Applications : proc. of the Twenty-eight Anniversary Seminar NPC'S'2021 in memory of Prof. V.I. Kuvshinov, Minsk, May 18–21 2021 / Объед. ин-т энергетич. и ядер. исследований – «Сосны» НАН Беларуси ; редкол.: В.А. Шапоров [и др.]. – Минск, 2021. – Vol. 27. – P. 455–466.

61—А. Сытова, С.Н. Математическое моделирование сложной нелинейной динамики излучения сильнооточных пучков заряженных частиц в неоднородных пространственно-периодических структурах / С.Н. Сытова // Веб-программирование и интернет-технологии WebConf2021: материалы 5-й Междунар. науч.-практич. конф., Минск, 18–21 мая 2021 г. / Мин. обр. Респ. Бел., БГУ; редкол.: И.М. Галкин (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2021. – С. 24–30.

62—А. Информационная система eLab для широкого круга применений / С.Н. Сытова, А.П. Дунец, А.Н. Коваленко, С.В. Черепица // Веб-программирование и интернет-технологии WebConf2021: материалы 5-й Междунар. науч.-практич. конф., Минск, 18–21 мая 2021 г. / Мин. обр.

Респ. Бел., БГУ; редкол.: И.М. Галкин (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2021. – С. 79–81.

63–А. Концепция Информационной системы учета источников ионизирующего излучения, ядерного материала и радиоактивных отходов для предприятий и организаций Республики Беларусь / С.Н. Сытова, А.П. Дунец, А.Н. Коваленко, С.В. Черепица // Информационные технологии в промышленности, логистике и социальной сфере. ITI*2021: тез. докл. XI Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 26–27 мая 2021 г. / НАН Беларуси, ОИПИ НАН Беларуси, Мин. пром. Респ. Бел., Мин. обр. Респ. Бел., БНТУ, БГУ, БГУИР. – Минск, 2021. – С. 141–143.

64–А. Фреймворк Elab для развития системы научно-технической информации Республики Беларусь / С.Н. Сытова, А.П. Дунец, А.Н. Коваленко, С.В. Черепица // Информационные технологии в промышленности, логистике и социальной сфере. ITI*2021: тез. докл. XI Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 26–27 мая 2021 г. / НАН Беларуси, ОИПИ НАН Беларуси, Мин. пром. Респ. Бел., Мин. обр. Респ. Бел., БНТУ, БГУ, БГУИР. – Минск, 2021. – С. 144–147.

65–А. Информационная система учета источников ионизирующего излучения, ядерных материалов и радиоактивных отходов [Электронный ресурс] / С.Н. Сытова, В.В. Гавриловец, А.П. Дунец, А.Н. Коваленко, С.В. Черепица // CSIST'2022. Информационные системы и технологии = Information Systems and Technologies : материалы междунар. науч. конгресса по информатике, Минск, 27–28 окт. 2022 г. В 3 ч. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: С.В. Абламейко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2022. – Ч. 2. – С. 277–282. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

66–А. Использование семантических технологий для развития портала ядерных знаний BELNET [Электронный ресурс] / С.Н. Сытова, В.В. Гавриловец, А.П. Дунец, А.Н. Коваленко, С.В. Черепица // CSIST'2022. Информационные системы и технологии = Information Systems and Technologies : материалы междунар. науч. конгресса по информатике, Минск, 27–28 окт. 2022 г. В 3 ч. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: С.В. Абламейко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2022. – Ч. 3. – С. 193–198. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

67–А. Управление ядерными знаниями в системе научно-технической информации Республики Беларусь / С.Н. Сытова, А.Р. Барткевич, К.А. Веренич, В.В. Гавриловец, В.Л. Гурачевский, А.П. Дунец, А.Н. Коваленко, Н.И. Поляк, С.В. Черепица // Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации (РИНТИ-2022):

доклады XXI Междар. науч.-технич. конф., Минск, 17 ноября 2022 г. / ОИПИ НАН Беларуси. – Минск, 2022. – С. 265–269.

68–А. Белорусская специализированная информационная архивная онлайн-система ядерных знаний / С.Н. Сытова, В.В. Гавриловец, А.П. Дунец, А.Н. Коваленко, С.В. Черепица // Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации (РИНТИ-2022): доклады XXI Междар. науч.-технич. конф., Минск, 17 ноября 2022 г. / ОИПИ НАН Беларуси. – Минск, 2022. – С. 270–274.

69–А. Nuclear knowledge management in the Republic of Belarus / S. Sytova, S. Charapitsa, A. Kavalenka, A. Dunets, V. Haurilavets // Nonlinear Dynamics and Applications : proc. of the Twenty nine Anniversary Seminar NPCS'2022, Minsk, June 21–24 2022 / Объед. ин-т энергетич. и ядер. исследований – «Сосны» НАН Беларуси ; редкол.: В.А. Шапоров [и др.]. – Minsk, 2022. – Vol. 28. – P. 440–449.

70–А. Белорусский портал ядерных знаний BelNET: вчера, сегодня, завтра / С.Н. Сытова, А.Р. Барткевич, К.А. Веренич, В.В. Гавриловец, А.П. Дунец, А.Н. Коваленко, Н.И. Поляк, А.Л. Холмецкий, С.В. Черепица // Сахаровские чтения 2023 года: экологические проблемы XXI века : материалы 23-й Междунар. научн. конф., Минск, 18–19 мая 2023 г. В 2 ч. / Мин. обр. Респ. Бел., УО «Междунар. гос. экологич. ин-т имени А.Д. Сахарова» Бел. гос. ун-та; редкол.: А.Н. Батян [и др.]. – Минск, 2023. – Ч. 2. – С. 158–162.

71–А. Белорусское программное обеспечение для учета ядерных материалов на основе свободного программного обеспечения / С.Н. Сытова, А.П. Дунец, А.Н. Коваленко, С.В. Черепица // Сахаровские чтения 2023 года: экологические проблемы XXI века : материалы 23-й Междунар. научн. конф., Минск, 18–19 мая 2023 г. В 2 ч. / Мин. обр. Респ. Бел., УО «Междунар. гос. экологич. ин-т имени А.Д. Сахарова» Бел. гос. ун-та; редкол.: А.Н. Батян [и др.]. – Минск, 2023. – Ч. 2. – С. 167–171.

72–А. Информационно-коммуникационные технологии в ядерном секторе управления, образования и науки / С.Н. Сытова, В.В. Гавриловец, А.П. Дунец, А.Н. Коваленко, С.В. Черепица // Информационные технологии в промышленности, логистике и социальной сфере. ITI*2023: тез. докл. XII Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 21–22 сентября 2023 г. / НАН Беларуси, ОИПИ НАН Беларуси, Мин. пром. Респ. Бел., Мин. обр. Респ. Бел., БНТУ, БГУ, БГУИР. – Минск, 2023. – С. 140–143.

73–А. Семантический портал ядерных знаний BelNET / С.Н. Сытова, В.В. Гавриловец, А.П. Дунец, А.Н. Коваленко, С.В. Черепица // Информационные технологии в промышленности, логистике и социальной

сфере. ITI*2023: тез. докл. XII Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 21–22 сентября 2023 г. / НАН Беларуси, ОИПИ НАН Беларуси, Мин. пром. Респ. Бел., Мин. обр. Респ. Бел., БНТУ, БГУ, БГУИР. – Минск, 2023. – С. 144–147.

74–А. Специализированные глоссарии для портала ядерных знаний / С.Н. Сытова, К.А. Веренич, В.В. Гавриловец, А.П. Дунец, А.Н. Коваленко, Н.И. Поляк, А.Л. Холмецкий, С.В. Черепица // Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации (РИНТИ-2023): доклады XXII Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 16 ноября 2023 г. / ОИПИ НАН Беларуси. – Минск, 2023. – С. 227–231.

75–А. Ядерно-физические данные в системе научно-технической информации Республики Беларусь / С.Н. Сытова, И.А. Серенкова, О.М. Дерюжкова, А.Н. Коваленко // Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации (РИНТИ-2023): доклады XXII Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 16 ноября 2023 г. / ОИПИ НАН Беларуси. – Минск, 2023. – С. 232–236.

Тезисы

76–А. Batrakov, K. Simulation of VFEL (Volume Free Electron Laser) Oscillator / K. Batrakov, S. Sytova // 26th International Free Electron Laser Conference & 11th FEL Users Workshop (FEL2004): conf. progr. and abstracts, Trieste, Italy, Aug. 29 – Sept. 3 2004. – Trieste, Italy, 2004. – P. 49.

77–А. Сытова, С.Н. Моделирование хаотической динамики объемных лазеров на свободных электронах / С.Н. Сытова // X Белорусская математическая конференция: тез. докл. Междунар. науч. конф., Минск, 3–7 ноября 2008 г. / ГНУ «Институт математики НАН Беларуси», Бел. гос. ун-т. – Минск, 2008. – Ч. 4. – С. 91.

78–А. Сытова, С.Н. Нелинейные эффекты генерации в объемных лазерах на свободных электронах (ОЛСЭ) / С.Н. Сытова // XIV Международная зимняя школа-семинар по электронике сверхвысоких частот и радиофизике, Саратов, 3–8 февраля 2009 г. / Саратовский гос. ун-т имени Н.Г. Чернышевского, Саратовский филиал ИРЭ РАН; редкол.: Д.И. Трубецков [и др.]. – Саратов, 2009. – С. 93.

79–А. Sytova, S. Some aspects of numerical investigation of Volume Free Electron Laser nonlinear stage / S. Sytova // Mathematical Modelling and Analysis: abstr. of the 14th Internat. conf., Daugavpils, Latvia, May 27–30 2009 / The European Consortium for Mathematics in Industry (ECMI), Daugavpils

University, University of Latvia, Vilnius Gediminas Technical University. – Daugavpils, 2009. – P. 81.

80–А. Сытова, С.Н. Компьютерное моделирование объемных лазеров на свободных электронах с помощью компьютерной программы VOLC / С.Н. Сытова // Международная научно-практическая конференция «Веб-программирование и интернет-технологии (WebConf09)», Минск, 8–10 июня 2009 г. / Бел. гос. ун-т. – Минск, 2009. – Ч. 2. – С. 59–60.

81–А. Sytova, S.N. Chaos in Volume Free Electron Lasers / S.N. Sytova // Хаотические автоколебания и образование структур» ХАОС-2010: материалы IX Междунар. школы, Саратов, 4–9 октября 2010 г. / Саратов. гос. ун-т имени Н.Г. Чернышевского, Саратов. ф-л Ин-та радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН, Научно-образоват. центр нелинейной динамики и биофизики Саратов. ун-та, ФГУП «Алмаз», EUROSCIENCE Европейская ассоциация содействия развитию науки и техники. – Саратов, 2010. – С. 158.

82–А. Sytova, S. Details of Volume Free Electron Laser Nonlinear Dynamics / S. Sytova // Mathematical Modelling and Analysis: abstr. of the 16th Internat. conf., Sigulda, Latvia, May 25–28 2011 / The European Consortium for Mathematics in Industry (ECMI), University of Latvia, Vilnius Gediminas Technical University, Latvian Mathematical Society, Institute of Mathematics and Computer Science of University of Latvia. Riga, 2011. – P. 131.

83–А. Сытова, С.Н. Хаотическая динамика пучков заряженных частиц в пространственно-периодических средах / С.Н. Сытова // III Конгресс физиков Беларуси. Симпозиум, посвящ. 100-летию со дня рождения академика Ф.И. Федорова: сб. тез. и программа, Минск, 25–27 сент. 2011 г. / НАН Беларуси, Мин. обр. Респ. Бел., Ин-т физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси, Бел. гос. ун-т, ОО «Белорусское физическое общество», БРФФИ. – Минск, 2011. – С. 43–44.

84–А. Сытова, С.Н. Различные модели нелинейной динамики пучков заряженных частиц в пространственно-периодических средах / С.Н. Сытова // XV Международная зимняя школа-семинар по электронике сверхвысоких частот и радиофизике, Саратов, 6–11 февраля 2012 г. / Саратов. гос. ун-т имени Н.Г. Чернышевского, Саратов. ф-л Ин-та радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН, ФГУП «НПП «Алмаз», ФГУП «НПП «Контакт»; редкол.: Д.И. Трубецков [и др.]. – Саратов, 2012. – С. 23.

85–А. Сытова, С.Н. Учебно-научный портал ядерных знаний / А.С. Лобко, С.Н. Сытова, С.В. Черепица // IV конгресс физиков Беларуси: сб. науч. тр. симпозиума, посвящ. 100-летию со дня рождения академика Б.И. Степанова, Минск, 24–26 апреля 2013 г. / НАН Беларуси, Мин. обр. Респ.

Бел., Ин-т физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси, Бел. гос. ун-т, ОО «Белорус. физич. о-во», БРФФИ. – Минск, 2013. – С. 419–420.

86–А. Сытова, С.Н. Нелинейная динамика и хаос в процессах излучения заряженных частиц, движущихся в неоднородных пространственно-периодических структурах / С.Н. Сытова // Хаотические автоколебания и образование структур (ХАОС-2013): материалы X Междунар. школы-конф., Саратов, 7–12 окт. 2013 г. / Саратов. гос. ун-т имени Н.Г. Чернышевского, НОЦ «Сложные системы», НОЦ «Нелинейная динамика и биофизика», Саратов. ф-л Ин-та радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН; редкол.: Д.И. Трубецков [и др.]. – Саратов, 2013. – С. 48.

87–А. Сытова, С.Н. Исследование хаотической динамики объемных лазеров на свободных электронах (ОЛСЭ) под влиянием внешних электромагнитных волн [Электронный ресурс] / С.Н. Сытова // Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ-БГУИР, Минск, 18–19 марта 2014 г. / Мин. обр. Респ. Бел., УО «Бел. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники», БРФФИ. – Минск, 2014. – С. 46–47. – Режим доступа: <https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/912/2/%d0%b8%d1%81%d1%81%d0%bb%d0%b5%d0%b4%d0%be%d0%b2%d0%b0%d0%bd%d0%b8%d0%b5%d0%b8%20%d1%85%d0%b0%d0%be%d1%82%d0%b8%d1%87%d0%b5%d1%81%d0%ba%d0%be%d0%b9.pdf>. – Дата доступа: 04.03.2024.

88–А. Создание учебно-научного портала ядерных знаний [Электронный ресурс] / И.Я. Дубовская, Т.А. Савицкая, А.С. Лобко, С.Н. Сытова, С.В. Черепица // Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ-БГУИР, Минск, 18–19 марта 2014 г. / Мин. обр. Респ. Бел., УО «Бел. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники», БРФФИ. – Минск, 2014. – С. 450–451. – Режим доступа: <https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/1160/2/%d1%81%d0%be%d0%b7%d0%b4%d0%b0%d0%bd%d0%b8%d0%b5%20%d1%83%d1%87%d0%b5%d0%b1%d0%bd%d0%be.pdf>. – Дата доступа: 04.03.2024.

89–А. Classification and Systematization of Structure of Belarusian Educational and Research Portal of Nuclear Knowledge / S.N. Synova, S.V. Charapitsa, I.Ya. Dubovskaya, A. Lobko, T.A. Sabitskaya // Fundamental Problems of Nuclear Physics, Atomic Power Engineering and Nuclear Technologies (NUCLEUS 2014): book of abstr. of the LXIV Internat. conf., Minsk, July 1–4 2014 / Russian Academy of Sciences, Joint Institute for Nuclear Research, St.-Peterburg State Univ., Belarussian State Univ., Research Institute for Nuclear Problems of Belarussian State Univ., National Academy of Sciences of Belarus. – Minsk, 2014. – P. 268.

90—А. Сытова, С.Н. Применение фреймворка ELAB в атомной энергетике / С.Н. Сытова, А.С. Лобко, С.В. Черепица // Ядерные технологии XXI века : тез. докл. IV Междунар. конф., Минск, 21–23 окт. 2014 г. / НАН Беларуси, ГНУ «Объединенный институт энергетич. и ядер. исследований – СОСНЫ». – Минск, 2014. – С. 42–43.

91—A. Sytova, S. Nonlinear dynamics in radiation of charged particles moving in multidimensional spatially-periodic structures / S. Sytova // Mathematical Modelling and Analysis, Sigulda, Latvia, May 26–29 2015 / The European Consortium for Mathematics of Industry (ECMI), University of Latvia, Vilnius Gediminas Technical University, Latvian Mathematical Society, Institute of Mathematics and Computer Science of University of Latvia. – Rīga, 2015. – P. 88.

92—A. Implementation of portal of nuclear knowledge BelNET / S. Charapitsa, I. Dubovskaya, A. Lobko, A. Mazanik, T. Savitskaya, S. Sytova, A. Timoshchenko // CHERNE 2015 : 11-й семинар по европейскому сотрудничеству в области высшего образования и исследований по ядерной инженерии и радиологической защите, Минск, 1–5 июня 2015 г. / Мин. обр. Респ. Бел., Бел. гос. ун-т, Образовательная сеть «CHERNE», ООО «ДП ЮНИЛАБ». — Минск, 2015. – P. 21.

93—A. Steps in Creation of Educational and Research Web-Portal of Nuclear Knowledge BelNET / S. Charapitsa, I. Dubovskaya, I. Kimlenko, A. Kovalenko, N. Kulevich, A. Lobko, A. Mazanik, T. Savitskaya, S. Sytova A. Timoschenko // International Symposium “Mathematics of XXI Century & Natural Science : book of abstracts, St.-Petersburg, September 29 – October 3 2015 / Min. of Education of Russian Federation, Peter the Great St.Peterburg Polytechnic University, ed.: D.W. Serow. – St. Petersburg, 2015. – P. 31.

94—A. Sytova, S. Investigation of Chaos in Radiation of Charged Particles Moving in Non-One-Dimensional Periodical Structures / S. Sytova // International Symposium “Mathematics of XXI Century & Natural Science : book of abstracts, St.-Petersburg, September 29 – October 3 2015 / Min. of Education of Russian Federation, Peter the Great St.Peterburg Polytechnic University, ed.: D.W. Serow. – St. Petersburg, 2015. – P. 32.

95—А. Сытова, С.Н. Моделирование нелинейной динамики различных вариантов объемных лазеров на свободных электронах / С.Н. Сытова // V Конгресс физиков Беларуси (посвященный Международному году света), Минск, 27–30 октября 2015 г.: сб. науч. тр. / НАН Беларуси, Мин. обр. Респ. Бел., ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси», Бел. гос. ун-т, ОО «Белорусское физич. о-во», БРФФИ; редкол.: С.Я. Килин (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – С. 225–226.

96–А. Формирование контента учебно-научного портала ядерных знаний BelNET / С.Н. Сытова, М.Д. Дежурко, И.Я. Дубовская, И.М. Кимленко, А.Н. Коваленко, А.С. Лобко, А.Л. Мазаник, Н.И. Поляк, Т.А. Савицкая, А.И. Тимощенко, С.В. Черепица // V Конгресс физиков Беларуси (посвященный Международному году света), Минск, 27–30 октября 2015 г.: сб. науч. тр. / НАН Беларуси, Мин. обр. Респ. Бел., ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси», Бел. гос. ун-т, ОО «Белорусское физич. о-во», БРФФИ; редкол.: С.Я. Килин (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – С. 255–256.

97–А. Программное обеспечение портала ядерных знаний BelNET / С.Н. Сытова, С.В. Черепица, А.Л. Мазаник, Н.В. Кулевич // Веб-программирование и интернет-технологии Web-Conf 2015: материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 12–14 мая 2015 г. / Бел. гос. ун-т. – Минск, 2015. – С. 41.

98–А. Basic and applied science at the portal of nuclear knowledge BelNET / S.N. Sytova, S.V. Charapitsa, A.N. Kovalenko, A.L. Mazanik, T.P. Sidorovich // Engineering of scintillation materials and radiation technologies. ISMART 2016 = Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии. ИСМАРТ 2016: сб. тез. докл. пятой Междунар. конф., Минск, 26–30 сентября 2016 г. / Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University (Belarus), Institute for Scintillation Materials of National Academy of Sciences (Ukraine), Joint Institute for Nuclear Research (Russia). – Минск, 2016. – С. 119–120.

99–А. Свободное программное обеспечение в области ядерной и радиационной безопасности / С.Н. Сытова, А.Н. Коваленко, А.Л. Мазаник, Т.П. Сидорович, С.В. Черепица // Ядерные технологии XXI века: программа и тезисы докладов VI Междунар. конф., Минск, 25–27 октября 2016 г. / НАН Беларуси, ГНУ «Объед. ин-т энергетич. и ядер. исслед. – СОСНЫ». – Минск, 2016. – С. 21.

100–А. Белорусское программное обеспечение для автоматизации контроля и надзора за ядерной и радиационной безопасностью / С.Н. Сытова, А.П. Дунец, А.Н. Коваленко, А.А. Мазаник, Т.П. Сидорович, С.В. Черепица // Информационные технологии в промышленности, логистике и социальной сфере. ITI*2017: тез. докл. IX Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 23–24 мая 2017 г. / НАН Беларуси, ОИПИ НАН Беларуси, Мин. пром. Респ. Бел., Мин. обр. Респ. Бел., БНТУ, БГУ, БГУИР. – Минск, 2017. – С. 142–143.

101–А. Программное обеспечение для электронного портала ядерных знаний BelNET / С.Н. Сытова, А.П. Дунец, А.Н. Коваленко, А.А. Мазаник, Т.П. Сидорович, С.В. Черепица // Информационные технологии в промышленности, логистике и социальной сфере. ITI*2017: тез. докл. IX Междунар. науч.-технич. конф., Минск, **23–24** мая 2017 г. / НАН Беларуси,

ОИПИ НАН Беларуси, Мин. пром. Респ. Бел., Мин. обр. Респ. Бел., БНТУ, БГУ, БГУИР. – Минск, 2017. – С. 144–145.

102–А. Возможности формирования контента учебно-научного портала ядерных знаний BelNET / С.Н. Сытова, А.П. Дунец, А.Н. Коваленко, А.Л. Мазаник, Т.П. Сидорович, С.В. Черепица // VI Конгресс физиков Беларуси, посвящ. Году науки в Респ. Беларусь, Минск, 20–23 ноября 2017 г.: сб. науч. тр. / НАН Беларуси, Мин. обр. Респ. Бел., ГНУ «Ин-т физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси», БГУ, ОО «Бел. физич. о-во», БРФФИ, Науч.-технич. асс. «Оптика и лазеры»; редкол.: С.Я. Килин (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 399–400.

103–А. Сытова, С.Н. Верификация и валидация программы моделирования объемных лазеров на свободных электронах / С.Н. Сытова // VI Конгресс физиков Беларуси, посвящ. Году науки в Респ. Беларусь, Минск, 20–23 ноября 2017 г.: сб. науч. тр. / НАН Беларуси, Мин. обр. Респ. Бел., ГНУ «Ин-т физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси», БГУ, ОО «Бел. физич. о-во», БРФФИ, Науч.-технич. асс. «Оптика и лазеры»; редкол.: С.Я. Килин (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 401–402.

104–А. Сытова, С.Н. Информационные и интернет-технологии для изучения динамики излучения сильноточных пучков заряженных частиц в неоднородных пространственно-периодических структурах / С.Н. Сытова // Веб-программирование и интернет технологии WebConf2018: тез. докладов 4-й Междунар. научно-практ. конф., Минск, 14–18 мая 2018 г. / Бел. гос. ун-т; редкол.: И.М. Галкин (отв. ред.) [и др.]. – С. 113.

105–А. Sytova, S.N. Modeling of Complex Nonlinear Dynamics of Radiation of High-Current Particle Beams in Spatially-Periodic Structures / S.N. Sytova // XIX Intern. Conf. & School Foundations & Advances in Nonlinear Science and IV Intern. Symposium “Advances in Nonlinear Photonics”: progr. & book of abstr., Minsk, 24–28.09.2018 / Min. of Educ. of the Republic of Belarus, Belarusian State University. – St.-Peterburg, 2018. – P. 25–26.

106–А. Information Tool for Support of Activities in Supervision for Nuclear and Radiation Safety / S.N. Sytova, S.V. Charapitsa, A.P. Dunets, V.V. Hautylavets, A.N. Kovalenko, A.L. Mazanik, T.P. Sidorovich // Engineering of Scintillation Materials and Radiation Technologies ISMART 2018: book of abstr. of the Sixth Int. Conf., Minsk, 9–12 Oct. 2018 / Institute for Nuclear Problems, Bel. State Un-ty (Belarus), Institute for Scintillation Materials, National Academy of Sciences (Ukraine), Joint Institute for Nuclear Research (Russia). – Minsk, 2018. – P. 98–99.

107–А. Сытова, С.Н. Математическое моделирование объемных лазеров на свободных электронах. Сравнение с результатами экспериментальных исследований / С.Н. Сытова // XIII Белорусская математическая конференция:

материалы Междунар. науч. конф., Минск, 22–25 ноября 2021 г. В 2 ч. / Ин-т математики НАН Беларуси, БГУ. – Мн., 2021. – Ч. 2. – С. 48–49.

108–А. Сытова, С.Н. Моделирование излучения пучков заряженных частиц в пространственно-периодических структурах / С.Н. Сытова // VII Конгресс физиков Беларуси: сб. науч. тр., Минск, 26–28 апреля 2023 г. / НАН Беларуси, Мин. обр. Респ. Бел., ОО «Бел. физич. о-во», ГНУ «Ин-т физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси», БГУ, БРФФИ, Науч.-технич. асс. «Оптика и лазеры»; редкол.: Д.С. Могилевцев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2023. – С. 55–56.

109–А. Белорусский научный архив на основе портала ядерных знаний BelNET / С.Н. Сытова, А.Р. Барткевич, К.А. Веренич, В.В. Гавриловец, А.П. Дунец, А.Н. Коваленко, Н.И. Поляк, А.Л. Холмецкий, С.В. Черепица // VII Конгресс физиков Беларуси: сб. науч. тр., Минск, 26–28 апреля 2023 г. / НАН Беларуси, Мин. обр. Респ. Бел., ОО «Бел. физич. о-во», ГНУ «Ин-т физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси», БГУ, БРФФИ, Науч.-технич. асс. «Оптика и лазеры»; редкол.: Д.С. Могилевцев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2023. – С. 182–183.

110–А. Sytova, S. Volume Free Electron Lasers: yesterday, today and tomorrow [Electronic resource] / S.N. Sytova, V. G. Baryshevsky, A.I. Sytov // 2023 KPS Fall Meeting, Changwon, Korea, October 24–27, 2023. – Mode of access: https://www.kps.or.kr/conference/event/content/program/search_result_abstract.php?id=8574&tid=1466. – Date of access: 30.10.2023.

РЕЗЮМЕ

Сытова Светлана Николаевна

Моделирование нелинейной динамики электромагнитного излучения, генерируемого пучками заряженных частиц в неоднородных пространственно-периодических структурах

Ключевые слова: математическое моделирование, нелинейная динамика. электронные пучки, электронные приборы, объемные лазеры на свободных электронах, управление ядерными знаниями, информационная система, свободное программное обеспечение.

Цель работы: исследование методами математического моделирования сложной нелинейной динамики ОЛСЭ с целью создания инструмента для выбора оптимальных параметров и повышения эффективности применения усилителей и генераторов перестраиваемого когерентного излучения для различных приложений в науке и коммерческих разработках, а также создание информационных инструментов для сохранения и популяризации ядерных знаний, в том числе полученных в рамках диссертации.

Полученные результаты и их новизна. Разработаны обобщенные системы уравнений, описывающие различные варианты ОЛСЭ. Разработанные разностные схемы могут применяться при моделировании различных геометрий ОЛСЭ, а также поверхностных электромагнитных волн и поверхностных плазмонов. Разработан комплекс программ VOLC для экспресс-моделирования работы ОЛСЭ. Проведенное математическое моделирование подтвердило все основные физические закономерности и принципы работы ОЛСЭ. Показано, что для эффективной генерации существует оптимальный набор параметров системы. Впервые показано, что ОЛСЭ является динамической хаотической системой. Проведенное моделирование важно для будущих исследований с целью повышения эффективности генераторов и источников когерентного излучения в разных частотных диапазонах, реализации в экспериментальных исследованиях контроля и способов управления хаосом, а также выбора более оптимальных режимов работы ОЛСЭ. Создан электронный научно-образовательный портал ядерных знаний BelNET – составная часть белорусской системы современных ядерных знаний.

Рекомендации по использованию: Результаты могут быть использованы для разработки мощных источников электромагнитного излучения разных частотных диапазонов для применения в физике высоких энергий и других областях науки и техники. Портал ядерных знаний BelNET может быть использован в учебном процессе вузов, а также для информирования и повышения интернет-культуры молодого поколения.

РЭЗЮМЕ

Сытава Святлана Мікалаеўна

Мадэляванне нелінейнай дынамікі электрамагнітнага выпраменьвання, генераванага пучкамі зараджаных часціц у неаднамерных прасторава-перыядычных структурах

Ключавыя словы: матэматычнае мадэляванне, нелінейная дынаміка. электронныя пучкі, электронныя прыборы, аб'ёмныя лазеры на свабодных электронах, кіраванне ядзернымі ведамі, інфармацыйная сістэма, свабоднае праграмнае забеспячэнне.

Мэта дысертацыйнай работы: даследаванне метадамі матэматычнага мадэлявання складанай нелінейнай дынамікі АЛСЭ з мэтай стварэння інструмента для выбару аптымальных параметраў і павышэння эфектыўнасці прымянення ўзмацняльнікаў і генератараў перабудоўваецца кагерэнтнага выпраменьвання для розных прыкладанняў у навуцы і камерцыйных распрацоўках, а таксама стварэнне інфармацыйных інструментаў для захавання і папулярызацыі ядзерных ведаў, у тым ліку атрыманых у рамках дысертацыі.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Распрацаваны абагульненыя сістэмы раўнанняў, якія апісваюць розныя варыянты АЛСЭ. Распрацаваныя рознасныя схемы могуць прымяняцца пры мадэляванні розных геаметрыяў АЛСЭ, а таксама паверхневых электрамагнітных хваль і паверхневых плазмонаў. Распрацаваны комплекс праграм VOLC для экспрэс-мадэлявання працы АЛСЭ. Праведзенае матэматычнае мадэляванне пацвердзіла ўсе асноўныя фізічныя заканамернасці і прынцыпы работы АЛСЭ, атрыманы парогі генерацыі для эксперыментальных устаноў АЛСЭ НДІ ЯП БДУ. Паказана, што для эфектыўнай генерацыі існуе аптымальны набор параметраў сістэмы. Упершыню паказана, што АЛСЭ з'яўляецца дынамічнай хаатычнай сістэмай. Праведзенае мадэляванне важна для будучых даследаванняў з мэтай павышэння эфектыўнасці генератараў і крыніц кагерэнтнага выпраменьвання ў розных частотных дыяпазонах, рэалізацыі ў эксперыментальных даследаваннях кантролю і спосабаў кіравання хаосам, а таксама выбару больш аптымальных рэжымаў працы АЛСЭ. Створаны электронны навукова-адукацыйны партал ядзерных ведаў BelNET – састаўная частка беларускай сістэмы сучасных ядзерных ведаў.

Рэкамендацыі па выкарыстанні. Вынікі могуць быць скарыстаны для распрацоўкі магутных крыніц электрамагнітнага выпраменьвання розных частотных дыяпазонаў з мэтай іх ужывання для фізікі высокіх энергій і іншых абласцях навукі і тэхнікі. Партал ядзерных ведаў BelNET можа быць выкарыстаны ў навучальным працэсе ўстаноў адукацыі, а таксама для інфармавання і павышэння інтэрнет-культуры маладога пакалення.

SUMMARY

Sytova Svetlana Nikolaevna

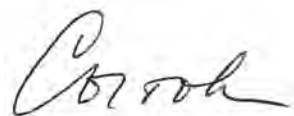
Modelling of nonlinear dynamics of electromagnetic radiation generated by charged particle beams in non-one-dimensional spatially periodic structures

Keywords: mathematical modelling, nonlinear dynamics. electron beams, electronic devices, volumetric free electron lasers, nuclear knowledge management, information system, free software.

Objective of the thesis: research using mathematical modeling methods of complex nonlinear dynamics of VFEL with the aim of creating a tool for selecting optimal parameters and increasing the efficiency of using amplifiers and generators of tunable coherent radiation for various applications in science and commercial development, as well as creating information tools for preserving and popularizing nuclear knowledge, including received in the frame of the dissertation work results.

Results obtained and their novelty. Generalized systems of equations are proposed that describe various variants of VFEL. The developed difference schemes can be used to simulate various VFEL geometries, as well as surface electromagnetic waves and surface plasmons. Computer program VOLC has been developed for express simulation of VFEL operation. The simulations carried out confirmed all the basic physical laws and operating principles of VFEL, and the generation thresholds for the experimental VFEL installations of the Institute for Nuclear Problems of BSU were obtained. It is shown for the first time that the VFEL is a dynamic chaotic. The conducted modelling is important for future research in order to increase the efficiency of generators and sources of coherent radiation in different frequency ranges, implement control and methods of chaos management in experimental studies, and select more optimal VFEL operating modes. An electronic scientific and educational portal of nuclear knowledge BelNET has been created as an integral part of the Belarusian system of modern nuclear knowledge.

Recommendations for use. The results can be used to develop powerful sources of electromagnetic radiation of different frequency ranges for the purpose of their use in high-energy physics and other fields of science and technology. The portal of nuclear knowledge BelNET can be used in the educational process of educational institutions, as well as to inform and to improve the Internet culture of the younger generation.



Подписано в печать 27.11.2024. Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.
Цифровая печать. Усл. печ. л. 3,02. Уч.-изд. л. 3,25.
Тираж 60 экз. Заказ 272.

Отпечатано с оригинала-макета заказчика
в республиканском унитарном предприятии
«Издательский центр Белорусского государственного университета».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 2/63 от 19.03.2014.
Ул. Красноармейская, 6, 220030, Минск.