

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи
УДК 519.6:621.384.633

КИЯН
Игорь Николаевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ
МНОГОЦЕЛЕВОГО ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА АИЦ-144**

Специальность: 05.13.18 – математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна – 2012

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований.

Научные руководители: кандидат физико-математических наук
Амирханов Илькизар Валиевич,
Лаборатория информационных технологий
ОИЯИ

кандидат физико-математических наук
Карамышева Галина Анатольевна,
Лаборатория ядерных проблем ОИЯИ

Официальные
оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Севастьянов Леонид Антонович,
Российский университет дружбы народов,
профессор

кандидат физико-математических наук,
с.н.с. Казаринов Николай Юрьевич,
Лаборатория ядерных реакций ОИЯИ,
начальник сектора

Ведущая организация: НИИ электрофизической аппаратуры
им. Д.В.Ефремова, г. Санкт-Петербург

Защита состоится « 05 » октября 2012 г. в 14-00 часов на заседании
диссертационного совета Д 720.001.04 в Лаборатории информационных
технологий Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской
области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан « 30 » августа 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,

профессор



Иванченко Иосиф Моисеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертации изложены результаты разработок и исследований, выполненных соискателем в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований (ЛЯП ОИЯИ) в период с 2004 по 2012 год в рамках проблемно-тематических планов научно-исследовательских работ ОИЯИ (№ 03-2-1102-2010/2012 “Совершенствование Фазотрона ЛЯП (ОИЯИ) и разработка циклотронов для физических и прикладных исследований”) и протоколов о международном сотрудничестве, осуществляющемся между ОИЯИ и Институтом ядерной физики Польской академии наук (ИЯФ ПАН) (№ 3970-2-10/12 “Протокол о выполнении совместной научно-исследовательской работы”). Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 10–01–00467–а.

Актуальность. В настоящее время одним из главных направлений в области развития ускорительной техники является разработка, производство и эксплуатация универсальных изохронных циклотронов. Они находят применение как в области научных исследований (производство радиоизотопов для исследований в области ядерной спектроскопии, электроядерная энергетика), так и в области медицины (производство радиоизотопов для различных видов томографии, протонная терапия раковых опухолей): DC-60¹, АИС-144², VINCY³. Циклотроны данного вида являются многоцелевыми и могут использоваться для ускорения частиц с различным отношением числа стандартных единиц атомной массы к числу элементарных зарядов (A/Z). Энергия вывода в таких машинах может плавно варьироваться для каждого типа ускоряемых частиц.

Диссертационная работа посвящена созданию и применению на практике новой методики математического моделирования режимов работы многоцелевого изохронного циклотрона АИЦ-144, расположенного в ИЯФ ПАН и

¹ <http://fls2.jinr.ru/flnr/dc60.html>

² <http://www.ifj.edu.pl/str/dc/index.html>

³ <http://www.vinca-at.org/tesla.html>

предназначенного как для проведения протонной терапии меланомы глаза у пациентов (при работе в основном режиме), так и для производства радиоизотопов, используемых в научных исследованиях в области ядерной спектроскопии. АИЦ-144 был разработан группой сотрудников ИЯФ ПАН под руководством д-ра Е.Схвабэ⁴. Система вывода АИЦ-144 была разработана группой сотрудников ОИЯИ при участии сотрудников ИЯФ ПАН⁵. Рассматриваемая методика позволяет моделировать новые режимы работы АИЦ-144 и переходить на работу с ними без остановки и разборки циклотрона для проведения дополнительных магнитных измерений. Новая методика содержит в себе набор алгоритмически связанных методов для расчета токов в главной катушке, двадцати концентрических катушках, в двух парах гармонических катушек, а также для численного контроля точности расчета изохронного магнитного поля, рассчитываемого по аналитическим формулам М.М.Гордона⁶ (Прил., п.1). Общий алгоритм моделирования новых режимов работы АИЦ-144 включает в себя расчет токов во всех катушках циклотрона [К6]÷[К13], численный контроль точности расчета изохронного магнитного поля [К14], аналитический расчет фазового движения⁷ и частот свободных колебаний [К3] ускоряемых ионов. В общий алгоритм входят рабочие алгоритмы, позволяющие по наибольшему значению тока выведенного пучка проводить:

- Улучшение фазового движения ускоряемых частиц, которое проводится за счет регулировки амплитуды центрального бампа результирующего магнитного поля циклотрона (от токов в главной катушке и в двадцати концентрических катушках) [К13].

⁴ Е.Схвабэ и др. Магнитная система автоматического изохронного циклотрона АИЦ-144. // Proceedings of the International Seminar on Isochronous Cyclotron Technique. Institute of Nuclear Physics, Krakow, 13th–18th November, 1978. Pp. 237–256. Krakow, 1978.

⁵ Nikolaj A. Morozov and others. A new extraction system for the upgraded АИЦ-144 cyclotron. // NUKLEONIKA, 2001. International Journal of Nuclear Research, V.46 (2). Pp. 51–57.

⁶ М.М.Гордон. Calculation of Isochronous Fields for Sector-Focused Cyclotrons // Particle Accelerators, 1983. Vol. 13. Pp. 67–84.

⁷ T.Stammach. Cyclotrons. // Joint Universities Accelerator School. Archamps–France. 1997.

- Оптимизацию параметров магнитной системы циклотрона (регулировку амплитуды и фазы первой гармоники рабочего магнитного поля ускорителя (от токов в главной катушке, в двадцати concentрических катушках и в двух парах гармонических катушек), проводимую на радиусе заброса пучка ускоренных ионов в электростатический дефлектор) [К13].

Режим работы АИЦ-144 представляет собой набор следующих параметров: тип ускоряемых частиц, значение напряжения на дуантах, значение частоты ВЧ-генератора и значения токов во всех катушках, формирующих рабочее магнитное поле циклотрона. Режим работы должен обеспечивать как успешное ускорение пучка заряженных частиц с заданными параметрами во всем диапазоне рабочих радиусов от источника ионов до системы вывода, так и вывод пучка ускоренных ионов из ускорителя.

В традиционном представлении переход на новый режим работы АИЦ-144 связан с необходимостью проведения дополнительных магнитных измерений, при которых циклотрон останавливают и разбирают с целью установки внутри вакуумной камеры измерительного оборудования. При этом измеряются карты основного магнитного поля (от тока в главной катушке) и карты дополнительных магнитных полей (от тока в главной катушке и максимального тока в каждой отдельно взятой concentрической катушке; от тока в главной катушке и максимального тока в каждой отдельно взятой паре гармонических катушек). Общее время перехода на новый режим работы АИЦ-144 занимает как минимум один месяц. Сюда входит время на разборку ускорителя, установку измерительного оборудования, измерение карт исходных магнитных полей, магнитные измерения в центре циклотрона, численные и аналитические расчеты, проведение ряда расчетно-экспериментальных итераций, включающих в себя поочередное измерение карт результирующего магнитного поля и пересчет устанавливаемого режима работы. Сюда также входит время на сборку, запуск и наладку работы ускорителя в новом режиме.

Намного более удобным представляется подход, когда новый режим работы моделируется без остановки и разборки циклотрона для проведения

дополнительных магнитных измерений. Моделирование в этом случае осуществляется на основе уже имеющихся измеренных и пересчитанных карт исходных магнитных полей. Такой подход требует разработки и развития, как ряда новых математических моделей, так и ряда программных и рабочих алгоритмов. При использовании нового подхода, время перехода на моделируемый режим работы значительно сокращается. Например, переход на основной режим работы АИЦ-144, осуществленный в июне 2009 года, занял всего шесть часов. Сюда вошло время на аналитические и численные расчеты, измерение тока внутреннего и внешнего пучка ускоренных ионов, а также время на улучшение фазового движения ускоряемых частиц. Еще два часа ушло на оптимизацию параметров магнитной системы циклотрона, проведенную на ускорителе в апреле 2011 года.

В связи с постоянным расширением круга задач, решаемых на многоцелевом изохронном циклотроне АИЦ-144, (увеличение кинетической энергии вывода, коэффициента вывода пучка ускоренных ионов и т.п.), а также в связи с изменением условий ускорения заряженных частиц (увеличение напряжения на дуантах, уход и восстановление параметров магнитной системы циклотрона и т.п.), регулярно возникает задача перехода на новые режимы работы циклотрона (задача формирования новых рабочих магнитных полей). Поскольку магнитные измерения на АИЦ-144 проводятся, в среднем, раз в шесть лет, а необходимость перехода на новые режимы работы возникает не реже чем раз в два года, задача разработки методов и алгоритмов математического моделирования, создания на их основе проблемно-ориентированных комплексов программ, использования созданного программного обеспечения для компьютерного моделирования новых режимов, оперативного перехода на работу с ними без остановки и разборки циклотрона для проведения дополнительных магнитных измерений является экономически целесообразной и актуальной.

Цель диссертационной работы заключается:

1. В разработке новой методики математического моделирования режимов работы многоцелевого изохронного циклотрона АИЦ-144, позволяющей переходить на работу в моделируемых режимах без остановки и разборки ускорителя для проведения дополнительных магнитных измерений.
2. В создании на языке программирования C++ в среде MS Visual Studio .NET комплекса программ Cyclotron Operator HELP Program Complex 2004–2012 и динамически связанной библиотеки GaussDLL, реализующих разработанные математические модели и алгоритмы.
3. В практическом применении разработанного программного обеспечения при компьютерном моделировании новых режимов работы АИЦ-144 (В том числе основного режима работы циклотрона: протоны, кинетическая энергия вывода $E_k \sim 60/60,4/60,5$ МэВ, частота ВЧ–генератора $F_{rf} = 26,155/26,25/26,26$ МГц).
4. В физическом запуске АИЦ-144 в основном режиме его работы и в практическом использовании пучка выведенных протонов для адронной терапии меланомы глаза у первой партии пациентов.

Научная новизна

1. Разработана новая методика математического моделирования режимов работы многоцелевого изохронного циклотрона АИЦ-144, позволяющая переходить на работу в моделируемых режимах без остановки и разборки ускорителя для проведения дополнительных магнитных измерений [К1]÷[К14].
2. Впервые созданы математическая модель и алгоритм, которые позволяют проводить расчет тока в главной катушке АИЦ-144 на основе карт исходных магнитных полей, измеренных для трех уровней тока в катушке возбуждения главного магнита [К9].
3. Разработан новый метод расчета токов в двадцати концентрических катушках для рассчитанного уровня тока в главной катушке АИЦ-144, основанный на минимизации квадратичного функционала, в состав которого введена штрафная функция. Данная функция предназначена для направленного покомпонентного

ввода вектора решения (вектора нормированных значений оптимизированных токов в концентрических катушках) в границы области допустимых значений. Ввод найденного вектора решения в рамки заданных граничных значений осуществляется в направлении, определяемом в соответствии с расположением зон влияния концентрических катушек на основное магнитное поле АИЦ-144 (от центра к краю циклотрона) [К6]÷[К10].

4. Впервые созданы математическая модель и алгоритм, которые позволяют проводить расчет токов в двух парах гармонических катушек для рассчитанного уровня тока в главной катушке АИЦ-144. Расчет проводится путем решения неоднородной системы нелинейных алгебраических уравнений, решаемой итерационным способом [К11]÷[К13].

5. Усовершенствован метод контроля точности расчета изохронного магнитного поля, рассчитываемого по аналитическим формулам М.М.Гордона. Показано, что для основного режима работы АИЦ-144 значение модуля относительной ошибки частоты обращения протонов во всем диапазоне изохронизации формируемого магнитного поля составляет $|\sigma_{F_0}| < 2,5E-4$, что сопоставимо по своей величине со значением модуля относительной погрешности измерения карт исходных магнитных полей, измеряемых с помощью датчика Холла, $|\sigma_{ms}| \sim 1 \div 2E-4$ [К14].

Практическая значимость

1. На языке программирования C++ в среде MS Visual Studio .NET в стандартах DBA (Dialog-based Application) и SDI (Single Document Interface) создано программное обеспечение, реализующее разработанные математические модели и алгоритмы:

- Комплекс программ Cyclotron Operator HELP Program Complex 2004–2012, установленный на сервере АИЦ-144 и используемый для моделирования новых режимов работы циклотрона.
- Динамически связанная библиотека GaussDLL, включающая в свой состав комплекс программ матрично-векторных операций и решения СЛАУ с

вещественными коэффициентами, размещенная на сайте ОИЯИ в библиотеке готовых программ JINRLIB [K15].

2. С помощью комплекса программ Cyclotron Operator HELP Program Complex 2009 для АИЦ-144 было выполнено компьютерное моделирование основного режима его работы, предназначенного для ускорения пучка протонов с необходимыми для протонной терапии меланомы глаза параметрами: кинетической энергией вывода $E_k \sim 60 \text{ МэВ}$, значением и стабильностью тока выведенного пучка $I_{beam,ext} \geq 20 \text{ нА}$, $\sigma I_{beam,ext} \sim \pm 5 \%$ соответственно [K7]÷[K10].

3. Смоделированный с помощью созданного программного обеспечения основной режим работы АИЦ-144 был установлен на циклотроне в июне 2009 года без эмпирической подстройки токов в концентрических катушках и частоты ВЧ-генератора. Благодаря эффективной работе сотрудников Циклотронного отдела ИЯФ ПАН и высокой стабильности установленного режима работы, подразделение протонной терапии ИЯФ ПАН впервые на протяжении ряда лет получило возможность бесперебойной работы и использования пучка выведенных протонов:

- Для настройки медицинских приборов и аппаратуры, которая проводилась в течение около двух лет с момента установки смоделированного режима работы на АИЦ-144.
- Для проведения успешной протонной терапии меланомы глаза у первой партии пациентов, впервые проведенной в Польше на АИЦ-144 в период с февраля по апрель 2011 года [K12]÷[K14].

4. С помощью комплекса программ Cyclotron Operator HELP Program Complex 2011 для основного режима работы АИЦ-144 в апреле 2011 года была проведена оптимизация параметров магнитной системы циклотрона [K13]. Выведенный пучок ускоренных протонов был успешно использован в ИЯФ ПАН для производства радиоизотопов, нарабатываемых с целью проведения научных исследований в области ядерной спектроскопии.

Практическая значимость разработанных методов и комплексов программ документально подтверждена: отчетами о проведенных на АИЦ-144 в период с 2004 по 2011 год физических экспериментах, подписанными начальником ЦО ИЯФ ПАН (Прил. п.2); письмом от дирекции ИЯФ ПАН к дирекции ЛИТ ОИЯИ ВД/47/2011 от 27 апреля 2011 года об успешных результатах лечения раковой опухоли глаза у первых девяти пациентов (Прил. п.3). Новая методика и разработанное программное обеспечение, используемые в настоящее время для моделирования режимов работы АИЦ-144, могут найти широкое практическое применение в процессе эксплуатации аналогичных ускорителей, расположенных в различных российских и зарубежных научно-экспериментальных центрах.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации представлены и доложены на следующих российских и международных конференциях:

- VI Международный семинар по проблемам ускорителей заряженных частиц памяти В.П.Саранцева, 8–10 сентября, 2005. Алушта, Украина.
- XXI Russian Particle Accelerator Conference 2008 (RuPAC 2008), September 28 – October 3, 2008. Zvenigorod, Russia.
- The International Conference Mathematical Modeling and Computational Physics 2009 (ММСР 2009), July 7–11, 2009. Dubna, Russia.
- Всероссийская конференция (с международным участием): Информационно–телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем. 18–22 апреля, 2011. Москва, Россия.
- IX Международный семинар по проблемам ускорителей заряженных частиц памяти В.П.Саранцева 17–21 сентября, 2011. Алушта, Украина.

Результаты, включенные в диссертацию, докладывались на семинарах ИЯФ ПАН, Лаборатории информационных технологий и Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований (ЛИТ ОИЯИ, ЛЯП ОИЯИ).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 14 печатных работах, из которых 7 статей в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК (в одном зарубежном и трех российских) [K2], [K5], [K6], [K8], [K9], [K13], [K14], 3 статьи в научных сборниках [K10]÷[K12], 2 статьи в сообщениях ОИЯИ [K3], [K4] и 2 аннотации докладов в материалах конференций [K1], [K7], а также в виде 1 распространяемого программного продукта [K15].

Личный вклад автора. Разработка общего алгоритма моделирования новых режимов работы АИЦ-144, формулировка решенных в диссертации задач, создание математических моделей для расчета токов во всех катушках циклотрона, усовершенствование метода численного контроля точности расчета изохронного магнитного поля, разработка проблемно-ориентированных комплексов программ, проведение с их помощью компьютерного моделирования новых режимов работы и физическая интерпретация полученных численных результатов выполнены автором самостоятельно. Соискатель принимал непосредственное участие в проведении на АИЦ-144 научно-методических натуральных экспериментов. Общая постановка задачи по созданию новой методики запуска АИЦ-144 в моделируемых режимах работы, анализ точности сделанных расчетов и достоверности полученных численных результатов, анализ результатов физических экспериментов проводились соискателем совместно с научными руководителями и соавторами.

Достоверность представленных в диссертации результатов моделирования новых режимов работы АИЦ-144 подтверждается:

- Результатами тестирования разработанного программного обеспечения: комплекса программ Cyclotron Operator HELP Program Complex 2004–2012 и динамически связанной библиотеки GaussDLL.
- Сопоставлением результатов компьютерного моделирования основного режима работы АИЦ-144, выполненного с помощью различных версий разработанного программного обеспечения.
- Методическими результатами контроля точности расчета изохронного магнитного поля, полученными путем сопоставления аналитических и численных

оценок, выполненных на основе использования расчетной карты результирующего магнитного поля АИЦ-144.

- Успешными результатами научно-методических натуральных экспериментов, проведенных на АИЦ-144 в период с 2004 по 2011 год. (Отчеты, удостоверенные подписью начальника ЦО ИЯФ ПАН (Прил. п.2)).

- Успешными результатами проведения протонной терапии меланомы глаза у первой партии пациентов, впервые проведенной в Польше на АИЦ-144 в период с февраля по апрель 2011 года. (Письмо от дирекции ИЯФ ПАН к дирекции ЛИТ ОИЯИ ВД/47/2011 от 27 апреля 2011 года (Прил. п.3)).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и приложения. Список работ, опубликованных по теме диссертации, содержит 15 наименований. Полный объем диссертации составляет 135 страниц машинописного текста, включая 8 таблиц и 47 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводятся общая характеристика и краткое содержание диссертационной работы, ставится задача на разработку новой методики математического моделирования режимов работы многоцелевого изохронного циклотрона АИЦ-144, позволяющей переходить на работу в моделируемых режимах без остановки и разборки ускорителя для проведения дополнительных магнитных измерений, дается ретроспектива решения поставленной задачи, приводится описание основных параметров и магнитной системы АИЦ-144.

Первая глава диссертации посвящена постановке задачи по моделированию основного режима работы АИЦ-144, предназначенного для ускорения и вывода пучка протонов с необходимыми для протонной терапии меланомы глаза параметрами. В этой главе рассматривается порядок проведения магнитных измерений, технология подготовки исходных данных, приводится описание разработанных математических моделей для расчета токов во всех катушках АИЦ-144 [К6]-[К13]. В первой главе рассматриваются уравнения движения,

записанные в приближении замкнутых равновесных орбит (без учета напряженности электрического поля), численное решение которых позволяет проконтролировать точность расчета изохронного магнитного поля в области изохронизации формируемого магнитного поля циклотрона [К14]. Все расчеты проводятся в безразмерных величинах (безразмерность параметра обозначается *). Под средними магнитными полями понимаются поля, усредненные по азимуту.

В первом параграфе ставится задача на моделирование основного режима работы АИЦ-144: протоны, кинетическая энергия вывода $E_k \sim 60/60,4/60,5$ МэВ, частота ВЧ-генератора $F_{rf} = 26,155/26,25/26,26$ МГц. В этом параграфе приводится содержание технического задания на ускорение пучка протонов с необходимыми для протонной терапии меланомы глаза параметрами.

Во втором параграфе рассматривается порядок проведения магнитных измерений и подготовки исходных данных, используемых при моделировании новых режимов работы АИЦ-144.

В третьем параграфе приводится описание двух разработанных математических моделей, используемых для расчета токов в главной катушке и в двадцати концентрических катушках для рассчитанного уровня тока в катушке возбуждения главного магнита АИЦ-144. Главная катушка используется для формирования основного магнитного поля. Концентрические катушки используются для коррекции основного и сведения его к результирующему магнитному полю. В этом параграфе рассматривается алгоритм обеспечения устойчивости искомого решения.

Математическая модель для расчета тока в главной катушке АИЦ-144 $I_{main,work}$ строится с помощью интерполяционного полинома Лагранжа второй степени. Расчет проводится исходя из заданного значения радиуса рабочей точки (места пересечения среднего основного и изохронного магнитных полей в области конечных радиусов ускорения ионов) R_{work} . Значение радиуса рабочей точки R_{work} определяет значение рабочего тока в главной катушке циклотрона $I_{main,work}$.

Указанная математическая модель и расчетный алгоритм подробно рассмотрены в статье [К9].

Математическая модель для расчета токов в двадцати концентрических катушках АИЦ-144 I_j , $j=1,2\dots z$ ($z=20$) для рассчитанного уровня тока в главной катушке $I_{main,work}$ строится на основе использования метода наименьших квадратов⁸. Математическая модель представляет собой квадратичный функционал, в состав которого введена штрафная функция, предназначенная для направленного покомпонентного ввода вектора решения (вектора нормированных значений оптимизированных токов в концентрических катушках) в границы области допустимых значений. Представленный ниже функционал формализует методику расчета токов в k концентрических катушках.

$$F(I_1^*, I_2^* \dots I_k^*) = \int_0^{R_{septum}^*} \left[\sum_{j=1}^k (\bar{B}_{j,max}^*(r^*) \cdot I_j^*) - \Delta \bar{B}^*(r^*) \right]^2 \cdot dr^* + \lambda^* \cdot \sum_{j=1}^k (k_{j,lim} \cdot I_j^*)^{2p} \quad (1)$$

$$\lambda^* = \left(\frac{\lambda}{\hat{B}_0 \cdot \sqrt{\hat{L}_0}} \right)^2, \quad k_{j,lim} = \frac{I_{j,max}}{I_{j,lim}}, \quad I_j^* = \frac{I_j}{I_{j,max}}, \quad I_{j,max} > 0 \quad (2)$$

где $\bar{B}_{j,max}^*(r^*)$ – это среднее магнитное поле максимального вклада j -ой концентрической катушки в основное магнитное поле; I_j , $I_{j,lim}$, $I_{j,max}$ – расчетный, предельный и максимально допустимый токи в j -ой концентрической катушке; r^* – средний радиус замкнутой равновесной орбиты; R_{septum}^* – радиус расположения первого ножа электростатического дефлектора; λ^* – переменный параметр штрафной функции; p – постоянный параметр штрафной функции; k – число свободных компонент вектора решения.

$$\Delta \bar{B}^*(r^*) = \bar{B}_{task}^*(r^*) - \bar{B}_{start}^*(r^*) \quad (3) \quad \bar{B}_{task}^*(r^*) = \bar{B}_{is}^*(r^*) + \bar{B}_{mask}^*(r^*) \quad (4)$$

⁸ C.M.Davisson, R.B.Theus. Linear Programming Vs Least Square Method in Determining the Best Trim Coil Currents for the NRL cyclotron. // Particle Accelerators, 1976. Vol. 7. Pp. 103–110.

$$\overline{B}_{mask}^*(r^*) = \delta \overline{B}_{bump}^*(r^*) + \delta \overline{B}_{edge}^*(r^*) \quad (5) \quad \overline{B}_{start}^*(r^*) = \overline{B}_{main}^*(r^*) + \sum_{j=1}^m \overline{B}_{j,const}^*(r^*) \quad (6)$$

$$\overline{B}_{j,const}^*(r^*) = \overline{B}_{j,max}^*(r^*) \cdot \frac{I_{j,const}}{I_{j,max}} \quad (7)$$

где $\Delta \overline{B}^*(r^*)$ – это разность между средним требуемым $\overline{B}_{task}^*(r^*)$ и средним исходным магнитным полем $\overline{B}_{start}^*(r^*)$; $\overline{B}_{is}^*(r^*)$ – изохронное магнитное поле; $\overline{B}_{mask}^*(r^*)$ – маска изохронного магнитного поля; $\delta \overline{B}_{bump}^*(r^*)$ – поправка к изохронному магнитному полю, формирующая среднее магнитное поле в центре циклотрона; $\delta \overline{B}_{edge}^*(r^*)$ – поправка к изохронному магнитному полю, формирующая среднее краевое магнитное поле; $\overline{B}_{main}^*(r^*)$ – среднее основное магнитное поле; $\overline{B}_{j,const}^*(r^*)$ – среднее магнитное поле вклада j -ой концентрической катушки в основное магнитное поле, ток в которой фиксируется пользователем на любом допустимом уровне или программой на одной из границ области допустимых значений (при исключении j -ой концентрической катушки из расчета – в нуле); $I_{j,const}$ – фиксированный ток в j -ой концентрической катушке; m – это число фиксированных компонент вектора решения. Для j -ой концентрической катушки нижнее $I_{j,low}$ и верхнее $I_{j,high}$ граничные значения ее тока задаются в рамках соответствующих минимально и максимально допустимых значений. То есть, предельный ток в j -ой концентрической катушке $I_{j,lim}$ определяется следующим образом:

$$I_{j,lim} = \begin{cases} I_{j,low}, & (-I_{j,max} \leq I_{j,low} < I_j < 0) \\ I_{j,high}, & (0 \leq I_j < I_{j,high} \leq I_{j,max}) \end{cases}, \quad I_{j,max} > 0, \quad j = 1, 2, \dots, z, \quad z = k + m \quad (8)$$

где z – это сумма k свободных и m фиксированных компонент вектора решения. Минимизация функционала проводится путем приравнивания нулю частных производных, взятых по каждой из свободных компонент искомого вектора решения. В результате ряда преобразований получается неоднородная система

нелинейных алгебраических уравнений, которая решается итерационным путем. На каждом шаге итерационного цикла формируется неоднородная система линейных алгебраических уравнений, которая решается с помощью метода Гаусса с выбором главного элемента по матрице коэффициентов. Устойчивость решения обеспечивается за счет исключения из расчета части задействованных концентрических катушек. Исключение проводится на основе использования нового критерия (минимального значения произведения функционального минимума на число обусловленности СЛАУ). Процесс построения указанной математической модели, описание расчетного алгоритма, результаты численных и физических экспериментов, проведенных на АИЦ-144, подробно рассмотрены в статьях [К6]÷[К10].

В четвертом параграфе приводится описание разработанной математической модели, используемой для расчета токов в двух парах гармонических катушек для рассчитанного уровня тока в главной катушке АИЦ-144. Две пары гармонических катушек используются для коррекции первой гармоники результирующего магнитного поля, которая корректируется на радиусе заброса пучка ускоренных ионов в электростатический дефлектор, и сведения результирующего магнитного поля к рабочему.

Математическая модель для расчета токов в двух парах гармонических катушек АИЦ-144 I_k , $k = z+1, z+2$ ($z=20$) для рассчитанного уровня тока в главной катушке $I_{main,work}$ строится на основе использования гармонического анализа рабочего магнитного поля циклотрона. Рабочее магнитное поле АИЦ-144 записывается в следующем виде:

$$B_{wrk}^*(r^*, \varphi) = B_{res}^*(r^*, \varphi) + \sum_{k=z+1}^{z+2} (B_{k,max}^*(r^*, \varphi) \cdot I_k^*), \quad I_k^* = \frac{I_k}{I_{k,max}} \quad (9)$$

где $B_{res}^*(r^*, \varphi)$ – это результирующее магнитное поле; $B_{k,max}^*(r^*, \varphi)$ – максимальный вклад k -ой пары гармонических катушек в результирующее магнитное поле; I_k и $I_{k,max}$ – ток и максимальный ток в k -ой паре гармонических катушек; z – число концентрических катушек. Для каждой пары гармонических катушек

нижнее $I_{k,low}$ и верхнее $I_{k,high}$ граничные значения ее тока задаются в рамках соответствующих минимально и максимально допустимых значений. То есть, предельный ток в k -ой паре гармонических катушек $I_{k,lim}$ определяется следующим образом:

$$I_{k,lim} = \begin{cases} I_{k,low}, & (-I_{k,max} \leq I_{k,low} < I_k < 0) \\ I_{k,high}, & (0 \leq I_k < I_{k,high} \leq I_{k,max}) \end{cases}, \quad I_{k,max} > 0, \quad k = z+1, z+2 \quad (10)$$

В результате ряда преобразований получается неоднородная система нелинейных алгебраических уравнений. При фиксированных значениях амплитуды и фазы первой гармоники рабочего магнитного поля, заданных на радиусе заброса пучка ускоренных ионов в электростатический дефлектор, неоднородная система нелинейных алгебраических уравнений превращается в неоднородную систему линейных алгебраических уравнений, которая решается стандартным путем. Процесс построения указанной математической модели, описание рабочего алгоритма оптимизации параметров магнитной системы АИЦ-144, результаты численных и физических экспериментов, проведенных на циклотроне, подробно рассмотрены в статьях [K11]–[K13].

В пятом параграфе рассматривается усовершенствованный метод контроля точности расчета изохронного магнитного поля, рассчитываемого по аналитическим формулам М.М.Гордона. Метод основан на сравнении результатов аналитического расчета относительной ошибки среднего магнитного поля (относительной разности среднего и изохронного магнитных полей) с результатами расчета относительной ошибки частоты обращения заряженных частиц (относительной разности частоты обращения и изохронной частоты обращения заряженных частиц), которые рассчитываются в зависимости от радиуса на основе использования расчетной карты результирующего магнитного поля АИЦ-144. Расчет частоты обращения заряженных частиц проводится путем численного решения уравнений движения, записанных в приближении замкнутых равновесных орбит (без учета напряженности электрического поля). Решение находится со специально выбранными начальными условиями,

задаваемыми с помощью выведенных аналитических выражений. В процессе нахождения решения начальные условия оптимизируются на основе использования критерия замкнутости равновесных орбит.

В качестве исходного уравнения для расчета динамики пучка ускоряемых ионов берется уравнение Лоренца-Ньютона, описывающее движение одиночной заряженной частицы в электромагнитном поле циклотрона.

$$\dot{\vec{p}} = q\vec{E} + q \cdot [\dot{\vec{r}} \times \vec{B}] \quad (11)$$

где \vec{p} – это релятивистский импульс заряженной частицы; q – заряд частицы; \vec{r} – радиус-вектор ускоряемого иона; \vec{E} – вектор напряженности электрического поля; \vec{B} – вектор индукции магнитного поля. В развернутом представлении уравнение Лоренца-Ньютона выглядит следующим образом:

$$m\ddot{\vec{r}} = q \cdot \left(\vec{E} + [\dot{\vec{r}} \times \vec{B}] - \frac{\dot{\vec{r}}}{c^2} \cdot (\dot{\vec{r}} \cdot \vec{E}) \right) \quad (12)$$

где m – релятивистская масса заряженной частицы, а c – скорость света. Уравнение Лоренца-Ньютона раскладывается по компонентам в цилиндрической системе координат. При этом используется правая тройка попарно перпендикулярных базисных векторов \vec{e}_r , \vec{e}_ϕ , \vec{e}_z , а проекция вектора магнитной индукции \vec{B} на ось OZ имеет отрицательные значения. В результате данного разложения получаются уравнения движения (система нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка). Уравнения движения, записанные в приближении замкнутых равновесных орбит, решаются методом Рунге–Кутты. Математическая модель, выведенные аналитические выражения, использующиеся для расчета начальных условий, а также результаты аналитических и численных расчетов, выполненных для основного режима работы АИЦ-144, подробно приведены в статье [К14].

В шестом параграфе приводятся основные выводы, сделанные на основе анализа материалов, изложенных в первой главе.

Вторая глава диссертации посвящена описанию созданного языке программирования C++ в среде MS Visual Studio .NET в стандартах DBA (Dialog-

based Application) и SDI (Single Document Interface) программного обеспечения, реализующего разработанные математические модели и алгоритмы.

В первом параграфе приводится описание комплекса программ Cyclotron Operator HELP Program Complex 2004–2012, предназначенного для компьютерного моделирования новых режимов работы АИЦ-144. Комплекс состоит из трех программ:

- 1) Magnetic Field Calculation Program 2012 – программа, предназначенная для расчета карт дополнительных магнитных полей.
- 2) Cyclotron Mode Calculation Program 2012 – программа, предназначенная для расчета токов во всех катушках циклотрона, а также для численного расчета частоты обращения и фазового движения ускоряемых частиц.
- 3) Cyclotron Analytic Model Program 2012 – программа для аналитического расчета изохронного магнитного поля, частот свободных колебаний, а также частоты обращения и фазового движения ускоряемых частиц.

Во втором параграфе приводится описание динамически связанной библиотеки GaussDLL, включающей в свой состав комплекс программ матрично-векторных операций и решения СЛАУ с вещественными коэффициентами [К15].

В третьем параграфе приводятся основные выводы, сделанные на основе анализа материалов, изложенных во второй главе.

Третья глава диссертации посвящена описанию технологии компьютерного моделирования новых режимов работы АИЦ-144, моделирование которых проводится с помощью комплекса программ Cyclotron Operator HELP Program Complex 2004–2012. В этой главе приводятся результаты физических экспериментов и эксплуатации АИЦ-144 в основном режиме его работы.

В первом параграфе приводятся результаты компьютерного моделирования основного режима работы АИЦ-144: протоны, кинетическая энергия вывода $E_k \sim 60/60,4/60,5$ МэВ, частота ВЧ–генератора $F_{rf} = 26,155/26,25/26,26$ МГц.

Во втором параграфе приводятся результаты запуска и эксплуатации АИЦ-144 в основном режиме его работы [К7]–[К14].

В период с 1998 по 2011 год на АИЦ-144 был проведен ряд магнитных измерений. Карты основных магнитных полей были измерены для трех уровней тока в главной катушке $I_{main,1}=535/570$ А; $I_{main,2}=570/585$ А; $I_{main,3}=600/600$ А в 1998÷1999, 2006/2011 годах соответственно. Карты дополнительных магнитных полей были измерены при токе в главной катушке $I_{main}=570$ А для концентрических катушек №1÷20 и для двух пар гармонических катушек в 1998÷1999 годах; для концентрических катушек №17÷20 в 2011 году. Карты основных магнитных полей NOWE010.TXT, 2006R045.TXT и 2011R109.TXT, 2011R152.TXT были измерены при токе в главной катушке $I_{main}=570$ А в 1999, 2006 годах и в 2011 году до и после установки вакуумной камеры в правильное положение соответственно. Содержащиеся в них основные магнитные поля значительно отличаются друг от друга по своей форме и величине амплитуды первой гармоники $B_1(r)$. На **Рис. 1** показан уход среднего основного магнитного поля, оцененный на основе измерений, сделанных в 2011 году, по сравнению с измерениями, сделанными в 2006 и 1999 годах. Значения средних основных магнитных полей для 2006R045.TXT и 2011R152.TXT на радиусе начала краевого магнитного поля $R_{edge}=0,6$ м приведены к единой величине, полученной для NOWE010.TXT на том же радиусе. На **Рис. 2** представлена амплитуда первой гармоники $B_1(r)$ основного магнитного поля, измеренного при токе в главной катушке $I_{main}=570$ А в 2006 году и в 2011 году до и после установки вакуумной камеры в правильное положение. Коррекция положения вакуумной камеры [К14] понадобилась из-за ее самопроизвольного сдвига, определенного из расчетов, сделанных во время оптимизации параметров магнитной системы АИЦ-144, проведенной в апреле 2011 года [К13]. Для обеспечения возможности оптимизации амплитуды и фазы первой гармоники рабочего магнитного поля амплитуда первой гармоники основного магнитного поля должна быть $B_1=3\pm 1$ Гс на радиусе заброса пучка ускоренных ионов в электростатический дефлектор $R_{ext}=0,62$ м.

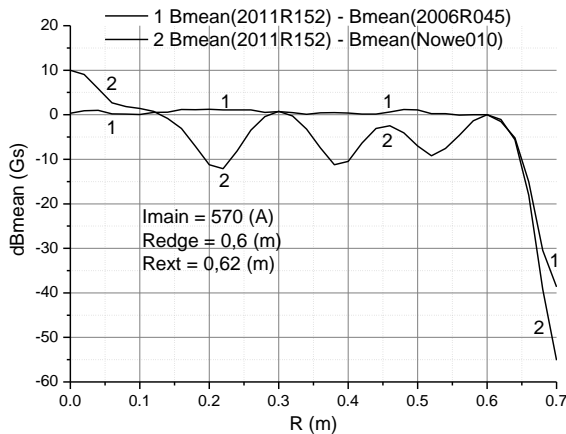


Рис. 1. Разность средних основных магнитных полей.

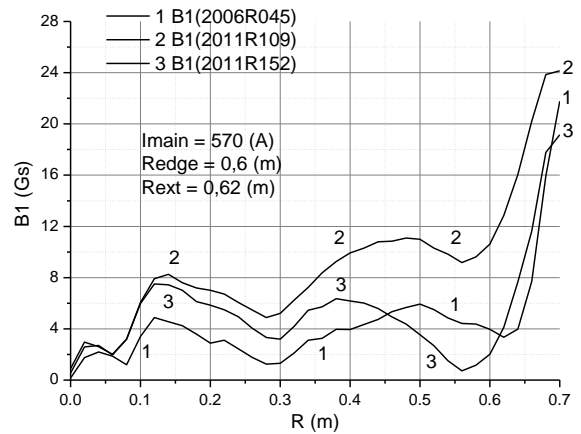


Рис. 2. Амплитуда первой гармоники основного магнитного поля.

Из Рис. 1 видно, что наибольший уход среднего основного магнитного поля наблюдается в краевой области. С 1999 по 2011 год он составил $|\Delta B_{mean}| \approx 55 \text{ Гс}$ на радиусе $R=0,7 \text{ м}$. Из Рис. 2 видно, что после установки вакуумной камеры в правильное положение в сентябре 2011 года величина амплитуды первой гармоники на радиусе заброса пучка ускоренных ионов в электростатический дефлектор $R_{ext}=0,62 \text{ м}$ была уменьшена от $B_1 \approx 13 \text{ Гс}$ до $B_1 \approx 4 \text{ Гс}$. На Рис. 3÷Рис. 5 показаны токи внутренних пучков ускоряемых протонов в зависимости от радиуса, измеренные на АИЦ-144 для основного режима его работы в 2007, 2009 и 2011 годах (Прил., п.2).

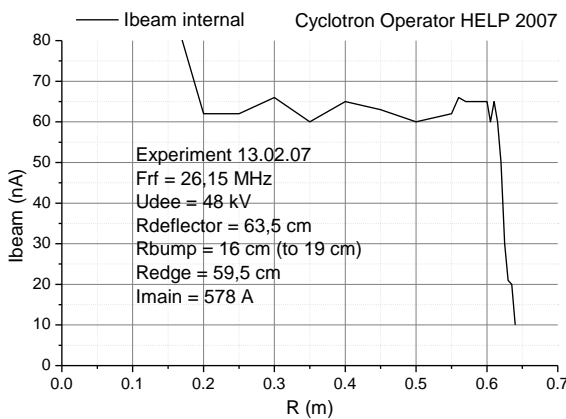


Рис. 3. Измеренный ток внутреннего пучка.

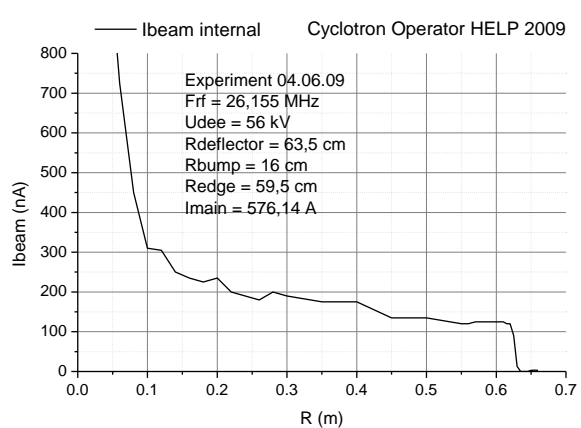


Рис. 4. Измеренный ток внутреннего пучка.

На **Рис. 6** показан ток пучка выведенных протонов в зависимости от тока в главной катушке, измеренный на АИЦ-144 для основного режима его работы в 2011 году (Прил., п.2). Значение тока пучка выведенных протонов $I_{beam,ext} = 2 \text{ nA}$ было установлено для оптимального тока в главной катушке путем регулировки параметров источника ионов (напряжения на катодe и расхода газа).

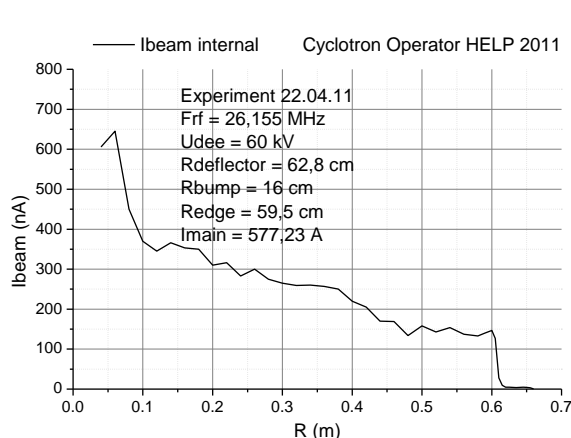


Рис. 5. Измеренный ток внутреннего пучка.

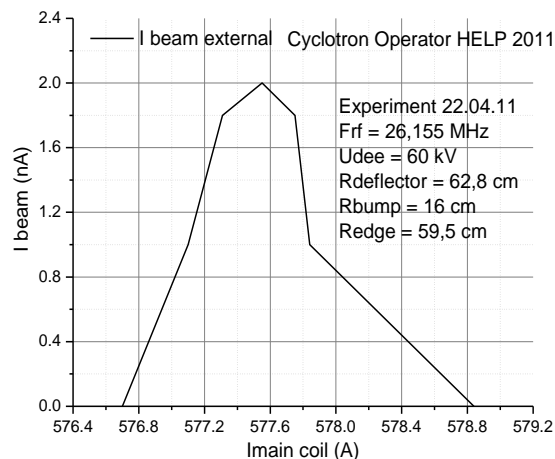


Рис. 6. Измеренный ток выведенного пучка.

Из **Рис. 3** видно, что в 2007 году внутренний пучок был ускорен без каких-либо потерь протонов в области изохронизации сформированного магнитного поля (от радиуса конца центрального бампа R_{bump} до радиуса начала краевого магнитного поля R_{edge}). Из рисунков **Рис. 4**, **Рис. 5** видно, что в указанной области рабочих радиусов к 2009 году появились потери ускоряемых протонов, которые несколько возросли к 2011 году. Ток внутреннего пучка, измеренный в эксперименте от 22.04.2011 года, по сравнению с измеренным в эксперименте от 04.06.2009 года, начинает спадать в краевом магнитном поле несколько раньше. Оптимальный ток в главной катушке АИЦ-144, установленный в эксперименте от 22.04.2011 года, по сравнению с установленным в эксперименте от 04.06.2009 года, несколько больше по своей величине. Появление и рост потерь ускоряемых протонов объясняются как уходом основного магнитного поля в краевой области (**Рис. 1**), так и увеличением амплитуды первой гармоники во всем диапазоне рабочих радиусов ускорения частиц от источника ионов до системы вывода (**Рис. 2**). Из

Рис. 6 видно, что при изменении тока пучка выведенных протонов от 90 % до 90 % от его установленного значения $I_{beam,ext} = 2 \text{ нА}$, диапазон изменения тока в главной катушке составил $\Delta I_{main\ coil} = 0,44 \text{ А}$, что говорит о хорошем качестве изохронизации сформированного магнитного поля и гарантирует стабильную работу АИЦ-144 в установленном режиме.

В третьем параграфе приводятся основные выводы, сделанные на основе анализа материалов, изложенных в третьей главе.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации, выносимые на защиту:

1. Разработана новая методика математического моделирования режимов работы многоцелевого изохронного циклотрона АИЦ-144, позволяющая переходить на работу в моделируемых режимах без остановки и разборки ускорителя для проведения дополнительных магнитных измерений [К1]÷[К14].
2. Впервые созданы математическая модель и алгоритм, которые позволяют проводить расчет тока в главной катушке АИЦ-144 на основе карт исходных магнитных полей, измеренных для трех уровней тока в катушке возбуждения главного магнита [К9].
3. Разработан новый метод расчета токов в двадцати concentрических катушках для рассчитанного уровня тока в главной катушке АИЦ-144, основанный на минимизации квадратичного функционала, в состав которого введена штрафная функция, предназначенная для направленного покомпонентного ввода вектора решения в границы области допустимых значений [К6]÷[К10].
4. Впервые созданы математическая модель и алгоритм, которые позволяют проводить расчет токов в двух парах гармонических катушек для рассчитанного уровня тока в главной катушке АИЦ-144. Расчет проводится путем решения неоднородной системы нелинейных алгебраических уравнений, решаемой итерационным способом [К11]÷[К13].
5. Усовершенствован метод контроля точности расчета изохронного магнитного поля, рассчитываемого по аналитическим формулам М.М.Гордона. Показано, что

для основного режима работы АИЦ-144 значение модуля относительной ошибки частоты обращения протонов во всем диапазоне изохронизации формируемого магнитного поля составляет $|\sigma_{F0}| < 2,5E-4$, что сопоставимо по своей величине со значением модуля относительной погрешности измерения карт исходных магнитных полей, измеряемых с помощью датчика Холла, $|\sigma_{ms}| \sim 1 \div 2E-4$ [K14].

6. На языке программирования C++ в среде MS Visual Studio .NET в стандартах DBA (Dialog-based Application) и SDI (Single Document Interface) был создан комплекс программ Cyclotron Operator HELP Program Complex 2004–2012, реализующий разработанные математические модели и алгоритмы.

7. С помощью комплекса программ Cyclotron Operator HELP Program Complex 2009 для АИЦ-144 было выполнено компьютерное моделирование основного режима его работы, предназначенного для ускорения пучка протонов с необходимыми для протонной терапии меланомы глаза параметрами [K7]–[K10].

8. Смоделированный с помощью созданного программного обеспечения основной режим работы АИЦ-144 был установлен на циклотроне в июне 2009 года без эмпирической подстройки токов в концентрических катушках и частоты ВЧ-генератора. Установленный режим работы был использован при проведении успешной протонной терапии меланомы глаза у первой партии пациентов, впервые проведенной в Польше на АИЦ-144 в период с февраля по апрель 2011 года [K12]–[K14].

9. С помощью комплекса программ Cyclotron Operator HELP Program Complex 2011 для основного режима работы АИЦ-144 в апреле 2011 года была проведена оптимизация параметров магнитной системы циклотрона [K13]. Выведенный пучок ускоренных протонов был успешно использован в ИЯФ ПАН для производства радиоизотопов, нарабатываемых с целью проведения научных исследований в области ядерной спектроскопии.

В приложении к диссертации приводятся аналитические формулы М.М.Гордона, используемые для расчета изохронных магнитных полей в циклотронах с малой величиной азимутальной вариации магнитного поля. Здесь также находятся

документы, подтверждающие успешные результаты физических экспериментов и эксплуатации АИЦ-144 в основном режиме его работы.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

К1. И.Н.Киян. Новый метод моделирования режимов работы многоцелевого изохронного циклотрона. // 6-ой Международный семинар памяти профессора В.П.Саранцева, 2005. Алушта, Украина. Сборник аннотаций D9-2005-123. Дубна 2005. С. 16.

К2. И.Н.Киян. Новый метод моделирования режимов работы многоцелевого изохронного циклотрона. // ПИСЬМА В ЭЧАЯ, 2006. Т.3, N7(136). Стр. 49-54.

К3. И.Н.Киян, Р.Тарашкевич. Анализ области применения аналитических формул для расчета частот свободных колебаний в изохронных циклотронах. // Сообщение ОИЯИ P9-2005-114, Дубна 2005.

К4. И.Н.Киян, Р.Тарашкевич. Методы расчета режимов работы и параметров изохронного циклотрона. // Сообщение ОИЯИ P9-2006-40, Дубна 2006.

К5. Igor N. Kiyani and others. Simulation of operation modes of isochronous cyclotron by a new iterative method. // NUKLEONIKA, 2007. International Journal of Nuclear Research, V.52 (1). Pp. 29-34.

К6. И.В.Амирханов, Г.А.Карамышева, И.Н.Киян, Я.Суликовский. Моделирование требуемых режимов работы и анализ их устойчивости для многоцелевых изохронных циклотронов. // ПИСЬМА В ЭЧАЯ, 2009. Т.6, № 6(155). Стр. 805-813.

К7. I.V.Amirkhanov, G.A.Karamysheva, I.N.Kiyani, J.Sulikowski. Mathematical Aspects of Modeling of Required Operation Modes of Multi Purpose Isochronous Cyclotrons. // The International Conference: Mathematical Modeling and Computational Physics, 2009. Dubna, Russia. Book of Abstracts D11-2009-88. Dubna 2009. Pp. 203-204.

К8. I.V.Amirkhanov, G.A.Karamysheva, I.N.Kiyani, J.Sulikowski. Mathematical Aspects of Modeling of Required Operation Modes of Multi Purpose Isochronous

Cyclotrons. // BULLETIN of PFUR. Series Mathematics. Information Sciences. Physics, 2010. No 2 (2). Pp. 99–103.

К9. И.В.Амирханов, Г.А.Карамышева, И.Н.Киян, Я.Суликовский. Методика математического моделирования режимов работы многоцелевых изохронных циклотронов. // ВЕСТНИК ТГУ. Серия: Прикладная математика, 2010. №9, Выпуск 1 (14). Стр. 55–68.

К10. И.В.Амирханов, Г.А.Карамышева, И.Н.Киян, Я.Суликовский. Улучшенная математическая модель расчета токов в концентрических катушках коррекции основного магнитного поля многоцелевого изохронного циклотрона. // Scientific report 2008–2009, LIT JINR. 2009–196. Pp. 109–112.

К11. И.В.Амирханов, Г.А.Карамышева, И.Н.Киян, Я.Суликовский. Решение обратной задачи расчета токов в гармонических катушках многоцелевого изохронного циклотрона. // Информационно–телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем. Тезисы докладов Всероссийской конференции с международным участием. 18–22 апреля 2011 года. Российский университет дружбы народов. Москва. 2011. Стр. 253–255.

К12. И.В.Амирханов, Г.А.Карамышева, И.Н.Киян, Я.Суликовский. Математическая модель расчета токов в двух парах гармонических катушек многоцелевого изохронного циклотрона. Контроль точности расчета изохронного магнитного поля. // Scientific report 2010–2011, LIT JINR. 2011–130. Pp. 135–138.

К13. И.В.Амирханов, Г.А.Карамышева, И.Н.Киян, Я.Суликовский. Оптимизация параметров магнитной системы многоцелевого изохронного циклотрона АИЦ-144. // ПИСЬМА В ЭЧАЯ, 2012. Т.9, № 2(172). Стр. 235–246.

К14. И.В.Амирханов, Г.А.Карамышева, И.Н.Киян, Я.Суликовский. Математическое моделирование основного режима работы многоцелевого изохронного циклотрона АИЦ-144. // ПИСЬМА В ЭЧАЯ, 2012. Т.9, № 4-5(174-175). Стр. 647–653.

К15. И.Н.Киян. GaussDLL. Комплекс программ матрично-векторных операций и решения СЛАУ с вещественными коэффициентами. // Библиотека готовых программ ОИЯИ JINRLIB: <http://wwwinfo.jinr.ru/programs/jinrlib/gaussdll/index.html>.