

## **Секция 2**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА**

## **ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ И ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ СКАНИРУЮЩИХ МАГНИТОВ СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЯ ОБЛУЧЕНИЯ ИОННОГО СИНХРОТРОНА**

*А. А. Акифьев, Р. П. Трунцева, А. М. Опекунов, Л. Е. Поляков*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В РФЯЦ-ВНИИЭФ создается многоцелевой комплекс, в составе которого планируется использование ускорителя синхротронного типа для изучения взаимодействия излучения с веществом [1, 2]. Формирование рабочего поля излучения широкого спектра ионов с энергией до сотен МэВ/нуклон в системе вывода излучения синхротрона обеспечивается активным и пассивным способами. При активном сканировании осуществляется развертка пучка частиц магнитным полем, создаваемым дипольными магнитами, на обмотки которых подается ток заданной частоты [3]. При длительной работе данной системы возникает необходимость принудительного охлаждения элементов сканирующих магнитов [4].

В данной работе приведены результаты расчетов системы формирования поля облучения на основе двух сканирующих магнитов. Приведены результаты расчетов характеристик магнитных полей для перечня заряженных частиц от протонов (700 МэВ) до ионов висмута (36 МэВ/нуклон) в дискретном и периодическом режимах работы системы сканирующих магнитов. Проведена оценка неоднородности поля облучения на объекте испытаний. Произведен тепловой расчет элементов конструкции сканирующих магнитов, на основе результатов которого определены требования к системе принудительного водяного охлаждения. Расчеты проведены с помощью программного пакета для моделирования, который позволяет проводить трехмерные расчеты физических процессов и проектирование электротехнических устройств.

### **Список литературы**

1. Будников Д. В. и др. Ядерные и электрофизические установки РФЯЦ-ВНИИЭФ: настоящее и будущее // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2021. Вып. 4. С. 5.

2. Завьялов Н. В. Исследовательские установки РФЯЦ-ВНИИЭФ для экспериментального получения фундаментальных и прикладных знаний в области ядерной, радиационной физики и физики быстропротекающих процессов // Успехи физических наук. 2021. Т. 191, № 9.

3. Лебедева Ж. С. Формирование дозных распределений в протонной онкоофтальмологии // Дис. – Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова, 2015.

4. Родштейн Л. П. Электрические аппараты // Учебник для техникумов. – 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоиздат, 1981.

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ НА ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКЕ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

*А. М. Болтаев, А. В. Зубков, В. П. Коваленко,  
В. М. Рябцев, О. И. Горчаков*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Разработана расчетная модель процесса генерации второй гармоники излучения неодимового лазера с использованием системы укороченных дифференциальных уравнений [1, 2] с учетом реальных параметров, в рамках которой определены требования для получения эффективности преобразования не ниже 60 %. Для преобразования излучения основной частоты ( $\lambda = 1053$  нм) с интенсивностью 1–2 ГВт/см<sup>2</sup> необходимо использовать кристаллы KDP с первым типом фазового синхронизма (00-е) толщиной 19–21 мм, угловая ошибка настройки кристаллов не должна превышать 50 мкрад. Проведенные расчеты хорошо согласуются с результатами экспериментов, проведенных на лазерной установке нового поколения.

### **Список литературы**

1. Дмитриев В. Г., Тарасов Л. В. Прикладная нелинейная оптика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. С. 512.
2. Гурдазян Г. Г., Дмитриев В. Г., Никогосян Д. Н. Нелинейно-оптические кристаллы. М: Радио и связь, 1991.

## УПРАВЛЕНИЕ РЕГИСТРАЦИЕЙ ПРОТОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА УСКОРИТЕЛЕ У-70

*Э. Н. Братишка, А. А. Городнов, А. А. Жирунов, М. С. Ефремов,  
А. Д. Решетняк, А. О. Пергаев<sup>1</sup>, Е. В. Рыбакова<sup>1</sup>*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

<sup>1</sup> СарФТИ НИЯУ МИФИ, г. Саров Нижегородской обл.

На синхротронном ускорителе протонов У-70 (НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ г. Протвино) проводятся работы на протонном радиографическом комплексе (ПРГК) [1]. Основной задачей данного комплекса является регистрация протонных изображений при проведении радиографических экспериментов. Для выполнения данной задачи в состав комплекса входят три пункта регистрации протонных изображений (ПРПИ). Каждый ПРПИ оснащен программно-аппаратным комплексом для регистрации протонных изображений, включающим в себя систему управления генераторами задержек, систему управления осциллографами, систему управления контроллерами объективов, систему позиционирования объектов и систему управления питанием. Для разработки программного обеспечения систем управления использовался инструментальный программный пакет CRW-DAQ [2].

Система управления генераторами задержек позволяет производить подбор параметров для каждого из устройств, а именно: время задержки относительно сигнала синхронизации ускорителя, амплитуду и длительность сигнала для срабатывания затвора ПЗС-регистраторов. Система управления осциллографами позволяет удаленно получать данные об интенсивности пучка с измерительного трансформатора тока (пояс Роговского) и о сигналах срабатывания затворов. При помощи системы управления контроллерами объективов производится подбор диафрагмы и настройка фокусировки изображения. Система позиционирования объектов дает возможность удаленно перемещать исследуемые объекты, управлять положением сцинтилляторов и реперных объектов. Система управления питанием обеспечивает бесперебойным питанием оборудование,

позволяет удаленно управлять подачей питания на аппаратные подсистемы (осциллографы, генераторы, регистраторы и т.д.) и отслеживать состояние внешней электрической сети.

### Список литературы

1. Андриянов А. И. и др. Ввод в эксплуатацию комплекса ПРГК на ускорителе У-70 ГНЦ ИФВЭ. Препринт ИФВЭ 2015-3. Протвино, 2015. С. 13.
2. Курякин А. В., Виноградов Ю. И. Программа для автоматизации физических измерений и экспериментальных установок (CRW-DAQ) // Свидетельство РФ об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006612848 от 10.08.2006 г. URL: [www.crw-daq.ru](http://www.crw-daq.ru).

## ИССЛЕДОВАНИЯ, НАПРАВЛЕННЫЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОЙ И ОДНОМЕРНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

*Д. А. Вишивков, С. Ю. Головкин, В. Н. Деркач,  
Л. А. Душина, В. Н. Пугачёва*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Проведены расчетно-теоретические и экспериментальные исследования, направленные на обеспечение высокой точности измерений состояния материалов при ударно-волновом воздействии. Показано, что погрешность измерения существенным образом зависит от одномерности и стационарности ударной волны.

Проведены стендовые исследования гомогенизаторов излучения, предназначенных для однородного облучения поверхности лазерной мишени и формированию ударной волны плоского типа. С их применением проведены эксперименты по облучению мишеней, получена неравномерность выхода УВ  $< 20$  пс в области размером  $\approx 600$  мкм. Проведена оптимизация конструкции мишеней с целью минимизации погрешности измерения термодинамических параметров сжатого вещества, вызванной нестационарностью движения ударной волны до нескольких процентов. Представлены результаты экспериментальных исследований ударной сжимаемости материалов в постановке с контролируемой симметрией облучения и конструкцией мишени, оптимизированной к нестационарности ударной волны.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ВНУТРИРЕЗОНАТОРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ YAG:ND ЛАЗЕРА

*Л. В. Гафурова, И. В. Касьянов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина»,  
г. Снежинск Челябинской обл.

Проведено исследование режимов работы внутрирезонаторной генерации второй гармоники в линейной схеме с выводом излучения через призму Глана-Тейлора (ПГ) на основе YAG:Nd лазера с длиной волны 1064 нм при использовании нелинейного кристалла LBO. Получены экспериментальные зависимости энергии, длительности и эффективности преобразования от длительности задержки для двух кристаллов с длинами 20 мм и 40 мм. Достигнута энергия генерации  $50,8 \pm 3,6$  мДж, при длительности импульса  $t = 11,2 \pm 0,8$  нс. Эффективность преобразования составила  $42 \pm 2$  %

## **ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РЕГИСТРАЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ МЕТАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ БРИЗАНТНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ**

*Г. А. Гребенкин, Е. Б. Смирнов, А. В. Сарафанников, Д. П. Кучко, К. М. Просвирнин, Д. Г. Панкратов, И. Г. Галиуллин, И. А. Ахлюстин, К. В. Еганов, К. М. Мирошкин, А. В. Воробьев, А. С. Грemitских, А. Г. Поцлов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина»,  
г. Снежинск Челябинской обл.

В газодинамической практике ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ» проведение экспериментов по метанию пластин продуктами взрыва взрывчатых веществ (ВВ) является очень распространенным и значимым для оценки и контроля качества параметров, серийно изготавливаемых ВВ. Данные, полученные в экспериментах, также необходимы для численного моделирования детонации.

Традиционно процесс метания пластины регистрируется при помощи методики М-60 [1] с использованием электроконтактных датчиков, которая обладает рядом недостатков.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование процесса метания стальной пластины продуктами взрыва бризантного ВВ с использованием интерферометрических методов регистрации – аппаратных комплексов радиоволновой и лазерно-гетеродинной методик (ЛГМ, PDV) в постановке методики М-60.

Регистрация процесса движения пластины с применением интерферометрических методик позволяет избавиться от ряда недостатков: невозможностью непрерывного и не возмущающего наблюдения разгона пластины во всем диапазоне измерений, а также трудоемкостью в изготовлении.

По результатам экспериментов были построены  $x-t$  и  $v-x$  зависимости по всем использованным методикам, а также рассчитана величина относительной метательной способности. Отмечена хорошая согласованность радиоволновой и лазерно-гетеродинной методик с электроконтактной.

Характер полученных зависимостей, позволил увидеть явление откола, происходящего в метаемой пластине, ранее не регистрируемой при использовании электроконтактной методики.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности внедрения интерферометрических методов регистрации для исследования метательной способности ВВ.

### **Список литературы**

1. Физика взрыва/ Под ред. Л. П. Орленко. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. С. 656. ISBN 5-9221-0220-6.

## ОДНОКАДРОВАЯ СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ТЕНЕВЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ СФЕРИЧЕСКИ ИЗОГНУТОГО КРИСТАЛЛА

*С. Д. Девятков, Е. С. Борисов, Д. А. Вихляев, Д. С. Гаврилов,  
А. В. Емельянов, Д. С. Носуленко, А. В. Потапов, Е. А. Пряхина,  
Н. Ю. Титаренко, П. А. Толстоухов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина»,  
г. Снежинск Челябинской обл.

Рентгеновские микроскопы на основе изогнутых кристаллов активно используются при экспериментальных исследованиях в области физики высоких плотностей энергии [1–3]. Они позволяют получать изображения объектов в рентгеновских лучах с высоким пространственным разрешением, а так же характеризуются большим полем зрения (до 1 мм). Кроме этого, системы на основе кристаллов обладают высоким спектральным разрешением на уровне  $\Delta\lambda/\lambda=10^{-3}\div 10^{-4}$ .

Разработана система регистрации теневых рентгеновских изображений, включающая в себя сферически изогнутый кристалл кварца ( $10\bar{1}1$ ) и ПЗС-камеру.

С помощью созданной системы продемонстрирована возможность получения теневых изображений объектов в лучах линии  $\text{Si Ly}_\alpha$  ( $E = 2,01$  кэВ), генерируемых при облучении кремниевых и стеклянных мишеней мощными пикосекундными лазерными импульсами.

В проведенных экспериментах спектр источника рентгеновской подсветки в диапазоне  $5,7\div 7,5$  Å измерялся спектрографом на основе кристалла КАР и фотолюминесцентного детектора.

Экспериментально определенное разрешение системы регистрации теневых изображений в сагитальном и меридиональном направлении составляет  $\delta = 20$  мкм, поле зрения – около 1 мм.

---

### Список литературы

1. Hall G. N. et al. The crystal backlighter imager: a spherically bent crystal imager for radiography on the National Ignition Facility [Текст] // Rev. Sci. Instrum. 2019. Vol. 90.
2. Schollmeier M. S. et al. A 7.2 keV spherical X-ray crystal backlighter for two-frame, two-color backlighting at Sandia's Z Pulsed Power Facility [Текст] // Rev. Sci. Instrum. 2017. Vol. 88.
3. Stoeckl C. et al. Soft X-ray backlighting of direct-drive implosions using a spherical crystal imager on OMEGA [Текст] // Rev. Sci. Instrum. 2012. Vol. 83.

## СТРУКТУРА СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ В АРГОНЕ, ПОДДЕРЖИВАЕМОГО ПОЛЕМ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ

*В. И. Жуков, Д. М. Карфидов*

Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва

Исследуется структура СВЧ разряда, поддерживаемого поверхностной электромагнитной волной [1] в кварцевых трубках различного диаметра, заполненных аргоном. Разряд на поверхностной волне возбуждался волноводным аппликатором с рабочей частотой 2.45 ГГц, мощностью 800 Вт, либо коаксиальным резонатором (сурфатроном) [2], работающим на частоте 460 МГц, мощностью 40 Вт. Эксперименты проводились в диапазоне давлений от 0,2 до 7 Торр, где частота столкновений электронов с нейтральными атомами много меньше круговой частоты СВЧ волны  $\nu_{en} \ll \omega$ .

Использован комплексный подход к измерению плотности плазмы. Абсолютные значения средней по сечению трубки концентрации электронов определены по дисперсионному соотношению для ПЭВ [3], связывающему измеряемую длину поверхностной волны с плотностью плазмы, и по методу прохождения диагностического СВЧ сигнала. Продольные и радиальные профили плотности плазмы получены по интенсивности свечения плазмы, пропорциональной концентрации электронов [3]. Показано, что при росте концентрации электронов радиальный вид профиля плотности изменяется от бесселева до столообразного и неоднородного с минимумом на оси трубки.

### Список литературы

1. Trivelpiece A. W. Slow wave propagation in plasma waveguides: The DP-degree Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, 1958.
2. Moisan M., Zakrewski Z. Plasma sources based on the propagation of electromagnetic surface waves // J. Phys. D: Appl. Phys. 1991. Vol. 24. P. 1025.
3. Zhukov V. I., Karfidov D. M., Sergeichev K. F. Propagation of Microwave Discharge Sustained by Surface Wave in Quartz Tube Filled with Low-Pressure Air // Plasma Phys. Rep. 2020. Vol. 46. N 8. P. 760–768.

## ДИАГНОСТИКА ПАРАМЕТРОВ СЛОЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В КРИОГЕННОЙ МИШЕНИ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

*Е. Ю. Зарубина*<sup>1,2</sup>, *М. А. Рогожина*<sup>1</sup>, *И. А. Чугров*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

<sup>2</sup> Филиал МГУ им. М. В. Ломоносова в г. Сарове,  
г. Саров Нижегородской обл.

Криогенные мишени, предоставляемые в лазерный эксперимент по зажиганию, должны соответствовать высоким требованиям: шероховатость внутренней поверхности криослоя должна быть в пределах 1 мкм [1], отклонения от однородности, сферичности, концентричности слоев – менее 1–2 % [2, 3]. В данной работе приведены результаты разработки методов контроля изотопов водорода в криогенной мишени.

Проведено двумерное моделирование прохождения пучка видимого излучения через криогенную мишень методом трассировки лучей с рядом переменных параметров, необходимое для исследования влияния различных факторов на формирование теневого изображения криомишени и вычисление параметров криогенного слоя, а также для исследования границ применимости оптического теневого метода.

Для получения твердого криогенного слоя требуемой толщины разработана программа вычисления видимой высоты мениска жидкого топлива по оптической теневой картине при наполнении оболочки изотопами водорода. Разработана программа для теневого контроля параметров твердого криослоя, в которой при известном диаметре и толщине оболочки по теневому изображению автоматически вычисляются и записываются в файл параметры криослоя: профиль, шероховатость, спектр мощности Фурье, отклонения от концентричности и сферичности внутренней поверхности криослоя, средняя толщина криослоя.

Проведено двумерное моделирование прохождения параллельного пучка рентгеновских лучей через сферически симметричную криогенную мишень с рядом переменных параметров, результат – смоделированное рентгеновское теневое изображение и нанесенные на него реальные границы криомишени.

---

**Список литературы**

1. Sangster T. C., Betti R., Craxton R. S. et.al. Cryogenic DT and D2 targets for inertial confinement fusion. PHYSICS OF PLASMAS 14, 058101, 2007.
2. Yan Tianliang, Wang Kai, Zang Zhongming et al. Compact, snapshot and triple-wavelength system for ICF target ice-layer refractive index and thickness measurement. Optics and Laser Technology 134 (2021) 106595.
3. Possible approaches to fast quality control of IFE targets. Koresheva E. R., Nikitenko A. I., Aleksandrova I. V. Nuclear Fusion, September 2006. C. 891.

## ОСОБЕННОСТИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ БОРОСОДЕРЖАЩИХ ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ

*Е. В. Карлина, Е. В. Халдеев, М. Ю. Батьков, С. Е. Гришина,  
А. В. Шкуряков, П. А. Крутиков*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В работе проведены исследования по реализации термодинамического потенциала бора в составе взрывчатых смесей. В настоящее время бор рассматривается в качестве перспективного компонента взрывчатых составов благодаря высокой теплоте сгорания (58000 кДж/кг), что, в теории, может значительно повысить теплоту взрыва взрывчатых веществ по сравнению с обычно используемыми добавками алюминия. Однако недостатком бора является неполнота сгорания, в виду чего существуют противоречивые мнения о перспективности его применения во взрывчатых составах. Авторы предполагают, что данное противоречие связано с различием в рецептурах взрывчатых составов в частности, с массовым содержанием взрывчатого компонента.

Для проверки данной гипотезы были проведены исследования работоспособности взрывчатых составов, содержащих бор, методом свинцовой бомбы (ГОСТ 4546-81).

В результате проведенных экспериментов выявлены следующие особенности использования бора во взрывчатых составах:

– при увеличении массовой доли бора за счет уменьшения взрывчатого компонента фугасность взрывчатых составов падает, что, вероятнее всего, связано со снижением общей температуры взрывчатого превращения. В результате, добавка бора сгорает не полностью и термодинамический потенциал системы не реализуется. Таким образом, необходимо соблюдать определенный баланс между массовым содержанием взрывчатого компонента и бора, при котором наблюдается значительное повышение фугасности.

– при соблюдении первого условия необходимо также оптимизировать кислородный баланс системы, используя добавку окислителя. При успешном воспламенении бора за счет взрывчатого компонента неболь-

шая добавка окислителя позволяет обеспечить его полное окисление, что положительно сказывается на фугасности взрывчатого состава.

– добавка алюминия также может применяться для воспламенения бора, но не является необходимой. Использование алюминия совместно с бором целесообразно для составов с относительно низким содержанием взрывчатого компонента. Однако, с точки зрения калорийности системы, наиболее перспективно использовать добавку бора без алюминия, обеспечивая воспламенение за счет детонации взрывчатого компонента.

## **ИССЛЕДОВАНИЯ В ИНТЕРЕСАХ ПОВЫШЕНИЯ ОДНОВРЕМЕННОСТИ ПРИХОДА ИМПУЛЬСОВ МНОГОКАНАЛЬНОЙ НЕОДИМОВОЙ УСТАНОВКИ НА ЛАЗЕРНУЮ МИШЕНЬ**

*В. А. Карпов, Д. В. Бакайкин<sup>1</sup>, Б. Г. Зималин, Р. Ю. Костюнин,  
С. А. Макаров, Р. В. Мокрецов, В. В. Мурылев, С. Ф. Попов, А. В. Савкин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Мощные лазерные установки на неодимовом стекле с наносекундной длительностью импульса излучения являются в настоящее время основным инструментом для проведения исследований в области инерциального термоядерного синтеза, а также в работах по взаимодействию мощного лазерного излучения с веществом. Такие установки строятся, как правило, по многоканальной схеме. Для эффективного облучения мишени в этом случае необходимо обеспечить одновременность прихода лазерных импульсов каждого канала на ее поверхность.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований по определению и оптимизации относительной временной задержки прихода импульсов 16 лазерных каналов в центр мишенной камеры многоцелевого исследовательского комплекса (МИК) установки нового поколения. Представлены результаты оптимизации двух модулей установки (4 кластера по 4 канала). Между кластерами посредством системы синхронизации возможно изменение моментов запуска задающих генераторов с точностью до 10 пс. Однако в пределах отдельно взятого кластера момент прихода лазерных импульсов на мишень можно регулировать только выравниванием оптических длин соответствующих каналов.

В результате проведенных исследований оптимизирована временная задержка между лазерными импульсами, фокусируемыми на поверхность лазерной мишени. Максимальная временная задержка импульсов в каналах составила менее 0,2 нс.

## РАЗЛОЖЕНИЕ ПЛАСТИФИЦИРОВАННОГО ОКТОГЕНА ЗА ФРОНТОМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

*А. М. Климов, К. Н. Панов, М. Е. Шаврин*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

При математическом моделировании процессов инициирования взрывчатых веществ (ВВ) широкое использование получили формально-кинетические модели, в которых из физических соображений задается функциональная связь между параметрами характеризующими процесс химического разложения ВВ, а экспериментальные данные используются для определения коэффициентов в соответствующих зависимостях. При этом процесс разложения ВВ характеризуется одной переменной  $\alpha$ , которая определяется как отношение массы прореагировавшего вещества к общей массе исходного ВВ.

В работах Г. И. Канеля по разложению литого тротила в ударных волнах описан расчетно-экспериментальный метод получения кинетических данных о процессе химического разложения. В работе С. Г. Андреева для извлечения кинетики разложения ВВ использовался метод квазитонких слоев (КТС).

Уменьшить погрешность определения  $\alpha$  можно путем одновременно измерения зависимостей  $V(t)$  и  $P(t)$  непосредственно в эксперименте. В настоящее время в литературе появилось много работ, посвященных исследованию состояния вещества за фронтом УВ (ДВ) с помощью излучений разного вида. Эти работы посвящены, главным образом, проблеме определения плотности вещества за фронтом ДВ или ИУВ. В данной работе предложен экспериментальный метод для определения закономерности разложения ВВ за фронтом УВ по зависимостям  $P(t)$  и  $V(t)$ , полученных в одном опыте.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование поведения смесового взрывчатого состава (ВС) при ударно-волновом нагружении предложенным методом.

В работе предложена схема проведения эксперимента при ударно-волновом нагружении заряда ВВ, позволяющая проводить в одном опыте одновременное измерение зависимостей  $P(t)$  и  $\rho(t)$  за фронтом инициирующей ударной волны. Полученные зависимости позволяют проследить изменение фазового состояния вещества за ударным фронтом в координатах  $P$ – $V$  и рассчитать изменение степени разложения взрывчатого вещества  $\alpha$  со временем после прохождения фронта ударной волны.

## **ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ АВТОГЕНЕРАТОРНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА ГЕНЕРИРУЕМЫЙ ВЫХОДНОЙ СИГНАЛ**

*Г. Н. Колесов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Проведена серия экспериментов с макетом автогенераторного измерительного преобразователя (АИП) [1], [2]. Исследовано влияние параметров измерительной цепи АИП на генерируемый выходной сигнал. Обнаружен неустойчивый режим генерации сигнала АИП. Показана фазовая динамика колебаний выходного сигнала в зависимости от параметров измерительной цепи АИП.

### **Список литературы**

1. Двинских В. А. Раздельные измерения составляющих комплексного сопротивления полупроводниковых объектов с большими потерями // Метрология. 1978. № 5. С. 49–55.
2. Парусов В. П. Автогенераторные преобразователи емкости с термисторным мостом в измерительной цепи // Приборы и техника эксперимента. 2003. № 5. С. 79–81.

## **РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЛАЗЕРНОЙ МИКРООБРАБОТКИ КОМПОНЕНТОВ МИШЕНЕЙ НА БАЗЕ ПИКОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА**

*Н. Н. Краева, И. А. Чугров, С. М. Прохоров,  
С. Ю. Батуков, Е. Ю. Соломатина*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

При проведении экспериментов на мощных лазерных установках возникает необходимость в изготовлении составных мишеней [1]. К компонентам таких мишеней предъявляются высокие требования по точности изготовления. Специфика микрообработки компонентов мишеней заключается в малых размерах элементов (от 0,7 до 2 мм). Для изготовления компонентов мишеней создана система лазерной микрообработки на базе пикосекундного лазера.

В докладе приведены сведения о конструкции лазерной системы и ее основные характеристики. Приведены примеры компонентов мишеней, изготовленных при помощи данной системы.

### **Список литературы**

1. Елисеев Г. М., Кузнецов П. Г., Плетенева Н. П., Тихонов А. В. Расчетные оценки параметров рентгеновского излучения в мишенях «Иллюминатор» для перспективной лазерной установки с энергией в импульсе 30–60 КДж. / Международная конференция «XX Харитоновские тематические научные чтения». // Сборник докладов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2019. Т. 1. С. 237–242.

## СОЗДАНИЕ МОЩНЫХ КОГЕРЕНТНЫХ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРНЫХ КАНАЛОВ

*Я. А. Крюков, С. В. Тютин, В. С. Цыкин,  
С. В. Хохлов, М. И. Коновальцов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Проведен расчет максимальной мощности [1] волоконного лазерного канала, собранного по схеме МОРА с использованием в качестве задающего генератора одночастотного волоконного лазера с шириной спектральной линии  $7,5 \times 10^{-8}$  нм.

Реализован инновационный способ увеличения ширины спектра в  $10^6$  раз при помощи двухкаскадной фазовой модуляции излучения задающего генератора [2, 3]. Впервые в России получено повышение порога ВРМБ более чем в 300 раз. Мощность выходного излучения составила 1 кВт, ширина спектра – 0,075 нм.

Предложена схема измерения ширины спектральной линии излучения при помощи отражательной дифракционной решетки.

### Список литературы

1. Беспрозванных В. Г., Первадчук В. П. «Нелинейные эффекты в волоконной оптике»: учебное пособие. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011.
2. Pengfei Ma, Rumao Tao, Rongtao Su, Xiaolin Wang, Pu Zhou and Zejin Liu «1.89 kW all-fiberized and polarization-maintained amplifiers with narrow linewidth and near-diffraction-limited beam quality» // Optics Express. 2016. Vol. 24, N 4. P. 4187–4195.
3. Yanshan Wang, Yujun Feng, Yi Ma, Zhe Chang, Wanjing Peng, Yinhong Sun, Qingsong Gao, Rihong Zhu, Chun Tang «2.5 kW Narrow Linewidth Linearly Polarized All-Fiber MOPA With Cascaded Phase-Modulation to Suppress SBS Induced Self-Pulsing» // IEEE Photonics Journal. 2020. Vol. 12, N 3. P. 1865–1878.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИОНОВ $O^{5+}$ В КАНАЛАХ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ПРОТОНОВ И ЛЕГКИХ ИОНОВ НА ЭНЕРГИЮ 7,5 МЭВ/НУКЛОН**

*М. И. Макарова, А. С. Борисков, Л. Е. Поляков*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В настоящее время ускорители заряженных частиц находят все более широкое применение в различных прикладных областях: промышленности, электронике, медицине и т. д. В процессе проектирования ускоряющей структуры важную роль занимают участки транспортировки пучка, которые обеспечивают формирование пучка и его согласование с различными частями ускорителя.

В данной работе приводятся результаты расчетов динамики пучка протонов и ионов кислорода в каналах транспортировки низкой (LEBT) и средней (MEBT-1 и MEBT-2) энергии частиц линейного ускорителя протонов и легких ионов. Расчеты проведены в собственном программном коде, разработанном на языке программирования C++. В работе приведены полученные на выходе каждого канала эмиттансы и вид траекторий частиц при прохождении ими различных участков структуры.

Результаты расчетов коррелируют с расчетными данными, полученными с использованием других пакетов программ расчетов динамики заряженных частиц.

## **ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РЕАЛИЗАЦИИ БУСТЕРНОГО СИНХРОТРОНА ТЯЖЕЛО-ИОННОГО СИНХРОТРОННОГО КОМПЛЕКСА РФЯЦ-ВНИИЭФ**

*П. С. Моисеева, А. С. Борисков, С. А. Ермолаев, М. С. Ефремов,  
А. А. Жирунов, А. В. Машагин, А. М. Опекунов, Д. С. Павлов,  
М. Л. Сметанин, Р. П. Трунцева, Д. С. Чемезов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В РФЯЦ-ВНИИЭФ создается ионный синхротронный комплекс для моделирования воздействия ионизирующих излучений космического пространства на изделия электронной компонентной базы [1]. В состав комплекса входит бустерный синхротрон, обеспечивающий ускорение широкого набора ионов от протонов до висмута с максимальной энергией протонов 700 МэВ и ионов висмута 36 МэВ/нуклон. Время перестройки режима ускорения типа ионов в «коктейле» составляет не более 30 минут. Особенностью бустерного синхротрона является возможность выпуска пучка ионов в двух режимах – медленный выпуск во всем диапазоне рабочих энергий и однооборотный выпуск на максимальной энергии. С помощью бустерного синхротрона станет возможным проводить эксперименты по оценке частоты одиночных радиационных эффектов при различных условиях эксплуатации.

Представлены конструктивно-компоновочные решения по реализации бустерного синхротрона. Представлены результаты расчета оптической структуры бустерного синхротрона, определены параметры основных элементов магнитной оптики. Отображены решения по реализации системы питания электромагнитов. Предложены технические решения по реализации вакуумной системы ускорителя, обусловленные ограниченным временем жизни ускоряемых ионов в остаточном газе. Представлена концепция системы управления и синхронизации установки в соответствии с рабочим циклом магнитного поля, обеспечивающая работу оборудования бустерного синхротрона.

### **Список литературы**

1. Будников Д. В. и др. Ядерные и электрофизические установки РФЯЦ-ВНИИЭФ: настоящее и будущее // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2021. Вып. 4. С. 5.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ ЗА ПРЕДЕЛАМИ ОБЛУЧАТЕЛЬНОГО ЗАЛА БУСТЕРНОГО УСКОРИТЕЛЯ СИНХРОТРОННОГО КОМПЛЕКСА

*В. Р. Николаев, Н. Н. Курапов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В данной работе представлены результаты численного моделирования и оценки радиационных условий за пределами облучательного зала бустерного ускорителя (БУ) синхротронного комплекса. Целью работы является оценка безопасности нахождения персонала в помещениях, смежных с облучательным залом БУ, при различных режимах работы этого ускорителя, а также определение пределов энергии и интенсивности ионного пучка, безопасных для работы персонала. Расчеты проводились с помощью программного пакета Geant4 [1].

На первом этапе расчетов проведены теоретическая оценка [2, 3] и моделирование радиационных полей снаружи облучательного зала при ускорении протонов до максимальной энергии в 700 МэВ. Проведенные расчеты показывают, что биологическая защита данного помещения в полной мере не удовлетворяет требованиям обеспечения радиационной безопасности персонала ускорителя в режиме работы на максимальную энергию.

На втором этапе проведены расчеты для протонов с меньшими энергиями, в целях определения параметров пучков ускоренных частиц, при которых спроектированная радиационная защита являлась бы достаточной.

На третьем этапе расчетов проанализирован возможный уровень облучения за пределами облучательного зала при ускорении пучков нескольких типов ионов в ряде от  $\text{He}^4$  до  $\text{Bi}^{209}$ , и показана относительная радиационная безопасность для персонала в смежных помещениях при ускорении этих ионов.

На последнем этапе расчетов смоделированы радиационные поля за пределами облучательного зала при изменении угла ввода пучка заряженных частиц в облучательный зал. Показано увеличение поглощенной дозы в тестовых объектах, расположенных за пределами облучательного зала по направлению излучения, при сопутствующем уменьшении поглощен-

ной дозы в объектах, расположенных с разных сторон от направления прямого распространения пучка.

По итогам расчетов были предложены ограничения по максимальным энергиям и интенсивностям пучков заряженных частиц в нескольких режимах работы БУ, соблюдение которых позволит персоналу находиться в помещениях, смежных с облучательным залом, без опасности получения повышенной дозовой нагрузки.

### Список литературы

1. Agostinelli S. et al. Geant4 – a simulation toolkit // Nuclear Instruments and Methods of Physics Research. 2003. Section A, Vol. 506(3), P. 250–303.

2. Комочков М. М., Лебедев В. Н. Практическое руководство по радиационной безопасности на ускорителях заряженных частиц. М.: Энергоатомиздат, 1986.

3. Тимошенко Г. Н. Радиационная защита высокоэнергетичных ускорителей. Дубна: Издательский отдел ОИЯИ, 2022.

## РОЛЬ НЕОДНОРОДНОГО УШИРЕНИЯ В ФОРМИРОВАНИИ СПЕКТРОВ ЛАЗЕРНЫХ ЖИДКОСТЕЙ, АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ $\text{Yb}^{3+}$

*О. Н. Николаева, Я. В. Кривошеев*

АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», г. Обнинск Калужской обл.

В последние годы растет интерес к лазерным средам, активированным ионами лантаноидов, в частности,  $\text{Yb}$ . В АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» синтезированы жидкие лазерно-активные среды, активированные ионами  $\text{Yb}^{3+}$ , на которых получена лазерная генерация. Для осознанного использования лазерной среды требуется знать характеристики актуальных для получения генерации переходов. До последнего времени форму этих переходов описывали контурами Лоренца или Гаусса. В реальности любой переход подвержен обоим типам уширения и описывается контуром Фойгта.

В данной работе путем разложения спектров поглощения и люминесценции на контуры Фойгта были получены характеристики переходов между уровнями  $\text{Yb}^{3+}$  в составе апротонных лазерных жидкостей. Проведен анализ спектров трех соединений  $\text{Yb}^{3+}$ : на основе трифторацетата, хлорида и тетрахлорметана. Результаты исследований позволили выявить влияние матрицы-окружения на штарковское расщепление состояний иона  $\text{Yb}^{3+}$  и получить количественное соотношение ее влияния на соотношение однородной и неоднородной составляющих в контурах, которое невозможно получить при разложении на контуры только Гаусса или только Лоренца.

## ГЕНЕРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЛАЗЕРНОЙ КЕРАМИКИ

*И. В. Касьянов, Р. П. Кононова, А. А. Новоселов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина»,  
г. Снежинск Челябинской обл.

Приведены результаты исследований параметров отечественных активных элементов, выполненных из оптической лазерной керамики YAG:Nd<sup>3+</sup>. Достигнута энергия лазерного излучения в режиме свободной генерации ~200 мДж, максимальное усиление слабого сигнала в имеющихся образцах составило 22. Результаты экспериментов позволяют оценить лазерно-генерационные свойства отечественной керамики.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПО МАЛОИНФОРМАТИВНОМУ ПОЛЮ РЕЛЬЕФА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

*А. А. Ногтев, А. В. Белинский*

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова»,  
Нижний Новгород

В данном докладе представлены результаты летно-экспериментальных работ при использовании способа повышения точности корреляционно-экстремальной навигационной системы (КЭНС) за счет применения алгоритма выявления в принятой информации от радиовысотомера (РВ) наличия линейных ориентиров и осуществления навигационной привязки к ним, а также обужения диаграммы направленности для принимаемых в РВ сигналов, благодаря методу стробирования принимаемых радиовысотомером отраженных импульсов.

Многие из известных способов повышения точности КЭНС требуют значительных затрат на проектирование и реализацию, либо сильно увеличивают время на обработку сигналов радиовысотомера, которая должна осуществляться в реальном времени. Проблемой является нахождение эффективных способов, которые позволят повысить точность навигации без существенных затрат и снижения скорости обработки сигналов.

Во время проведения экспериментальных исследований радиолокационного корректора системы автономной навигации были решены следующие задачи:

- произведена проверка функционирования всей КЭНС в целом;
- произведена оценка правильности работы навигационных алгоритмов с привязкой к линейным ориентирам;
- произведена оценка работоспособности алгоритма стробирования отраженных сигналов.

Применение алгоритма стробирования отраженных сигналов и использование информации о наличии линейных ориентиров при движении КЭНС по заданным траекториям над малоинформативными участками местности повышает точность определения навигационного местоположения движущегося объекта с установленной на нем КЭНС, что было подтверждено не только результатами теоретических проработок, но и результатами, полученными при проведении летных экспериментальных исследований.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕНТГЕНСПЕКТРАЛЬНЫМ МЕТОДОМ СТЕПЕНИ ПРОГРЕВА МИШЕНЕЙ, ОБЛУЧАЕМЫХ МОЩНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

*Д. С. Носуленко, Д. А. Вихляев, Д. С. Гаврилов, Е. С. Борисов,  
С. Д. Девятков, А. В. Емельянов, Н. Г. Карлыханов, П. А. Лобода,  
А. А. Овечкин, С. Н. Пахомов, Е. А. Пряхина, А. В. Потапов,  
Н. Ю. Титаренко*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина»,  
г. Снежинск Челябинской обл.

На пикосекундной лазерной установке проведены эксперименты по исследованию степени прогрева алюминиевых мишеней по спектрам многозарядных ионов при интенсивностях лазерного излучения  $I \sim 10^{17} \div 10^{19}$  Вт/см<sup>2</sup>.

Для измерения характеристического спектра плазмы алюминия применялся спектрограф на основе кристалла КАР, работающий по схеме Иоганна.

При облучении фольг толщиной от 1 до 400 мкм зарегистрированы линии внутриоболочечных переходов алюминия с различной степенью ионизации. На спектрах заметно уменьшение выхода линейчатого излучения H- и He-подобных ионов из мишеней толщиной 400 мкм по сравнению с остальными.

Величина эффективной температуры плазмы алюминия не зависит от толщины мишеней и возрастает с 0,3 кэВ до 0,8 кэВ при увеличении интенсивности лазерного излучения с  $10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup> до  $10^{19}$  Вт/см<sup>2</sup>.

Для мишеней, облучаемых с интенсивностью  $10^{17} \div 10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup>, проведены газодинамические расчеты, в которых ионный состав плазмы соответствует фактической плотности энергии излучения, а также учитывается однородное уширение линий. Получено удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных спектров.

Результаты измерения выхода линейчатого излучения многозарядных ионов и нейтральных атомов алюминия при различной интенсивности лазерных импульсов показывают наличие рециркуляции электронов в мишенях. Возможно, учет данного эффекта при моделировании процессов, происходящих при взаимодействии мощного лазерного излучения с веществом, позволит улучшить согласие результатов расчетов с экспериментами.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УСКОРЯЮЩЕГО РЕЗОНАТОРА С ПРОСТРАНСТВЕННО-ОДНОРОДНОЙ КВАДРУПОЛЬНОЙ ФОКУСИРОВКОЙ**

*Д. В. Павлов, М. А. Гузов, А. М. Опекунов, П. В. Опеньшев, Л. Е. Поляков*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В РФЯЦ-ВНИИЭФ спроектирован и изготовлен ускоряющий резонатор с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ) на энергию протонов 1 МэВ. На этапе разработки проведен цикл расчетов электродинамических характеристик резонатора с ПОКФ, таких как собственная частота, добротность и распределение электромагнитного поля. Проведен расчет динамики протонов в ускоряющей структуре. Разработана методика исследования электродинамических характеристик ускоряющей структуры, основанная на методе малых возмущений [1, 2]. Спроектирован набор возмущающих зондов для проведения измерений. На основе полученных данных доказана возможность ускорения протонов до энергии 1 МэВ в резонаторах с ПОКФ.

Результаты работы доказывают возможность дальнейшего применения разработанной методики и использование полученных в ходе проектировки зондов для измерения электродинамических характеристик резонансных структур.

### **Список литературы**

1. Вальднер О. А., Собенин Н. П., Зверев Б. В., Щендрин И. С. Диафрагмированные волноводы. М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 280.
2. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. 1970. С. 440.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИГМОИДАЛЬНОЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В УСКОРИТЕЛЬНОМ ТРАКТЕ ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ

*Г. Ю. Полина, Е. С. Михайлов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Вакуумные тракты безжелезных линейных индукционных ускорителей ЛИУ-10М и ЛИУ-Р-Т ограничены по радиусу внутренними поверхностями секционированных изоляторов индукторов и металлических дрейфовых труб между ними [1, 2]. Расчет электрических полей в вакуумном тракте линейного индукционного ускорителя сводится к задаче нахождения электрического поля в металлической трубе с аксиальными зазорами, распределение электрического потенциала в которых линейно. Аналитическое вычисление электрического поля приводит к интегралам Фурье с бесконечными пределами или к рядам Фурье [3, 4], в которых необходимо учесть довольно большое число членов разложения (не менее 10) для достижения необходимой точности, что делает вычисления довольно громоздкими. Использование аналитической аппроксимации позволит значительно упростить процесс расчета электрических полей.

В данной работе для описания распределения напряженности электрического поля использована экспоненциальная сигмоида [5]. Расчеты, выполненные с помощью данной функции, сопоставлены с результатами решения в виде разложения в ряд Фурье, а также с расчетами, проведенными в программах для 2-х мерного моделирования. Расхождение между результатами приведенных расчетов, выполненных для линейного индукционного ускорителя, не превышает 5 %.

### Список литературы

1. Босамыкин В. С., Герасимов А. И., Гордеев В. С. Безжелезные линейные индукционные ускорители электронов – мощные генераторы коротких импульсов тормозного излучения // Высокие плотности энергии. Сборник научных трудов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 1997.

2. Гордеев В. С., Мысков Г. А., Михайлов Е. С. Проект линейного индукционного ускорителя электронов ЛИУ-Р// Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Научно-исследовательское издание. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008. С. 120–127.
3. Силады М. Электронная и ионная оптика. М.: Мир, 1990.
4. Вахрушин Ю. П., Анацкий А. И. Линейные индукционные ускорители. М.: Атомиздат, 1978. С. 248.
5. Вакуленко С. А., Жихарева А. А. Практический курс по нейронным сетям. СПб: Университет ИТМО, 2018.

## РАСЧЕТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ФОКУСИРУЮЩЕМ УСТРОЙСТВЕ УСКОРИТЕЛЯ ЛИУ-Р-Т

*И. В. Пронин, Е. С. Михайлов, Н. Н. Утюмов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В работе представлены результаты расчетов магнитного поля для двух конструкций фокусирующего устройства ускорителя ЛИУ-Р-Т [1]: с блоком ленточных катушек, входящего в состав действующего устройства, и с модернизированным блоком, включающим двухзаходный спиральный соленоид, который предполагает лучшие ресурсные характеристики.

Получены осевые распределения индукции магнитного поля в фокусирующем устройстве. Показана возможность достижения магнитного поля 32 Тл. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными показало хорошее, в пределах 10 %, их соответствие.

Проведено численное моделирование процесса фокусировки электронного пучка ускорителя ЛИУ-Р-Т для рассчитанных распределений магнитного поля представленных конструкций фокусирующего устройства. Проведен сравнительный анализ характеристик сфокусированного пучка электронов. Показано, что модернизированное фокусирующее устройство, на основе двухзаходного спирального соленоида не уступает по своим возможностям действующему фокусирующему устройству.

### Список литературы

1. Основные достижения РФЯЦ-ВНИИЭФ 2018. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2019. С. 32–33., С. 35–36.

## ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УСКОРИТЕЛЯ ЛИУ-Р-Т

*И. В. Пронин, Е. С. Михайлов, Н. Н. Утюмов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Разработана расчетная модель ускорителя [1–2], включающая в свой состав инжектор, индукторы, тракт транспортировки и фокусирующее устройство.

Проведено численное моделирование динамики электронного пучка в ускорителе. Показано, что снижение диаметра цилиндрического катодного электрода с 19 до 8 мм позволяет уменьшить диаметр фокусного пятна на мишени с 6,0 до 2,8 мм. Однако уменьшение размеров фокусного пятна посредством уменьшения диаметра катода, приводит к заметному снижению амплитуды тока пучка с 11,7 до 7,0 кА, т. е. примерно в 1,7 раза, что влечет примерно такое же снижение дозы тормозного излучения. Результаты расчетов достаточно хорошо согласуются с результатами экспериментальных данных.

Полученные данные свидетельствуют, что разработанная расчетная модель может быть в дальнейшем использована для численных исследований режимов инжекции, ускорения и фокусировки сильноточных импульсных электронных потоков в ускорителе ЛИУ-Р-Т с целью сопро-вождения экспериментальных исследований.

### Список литературы

1. Басманов В. Ф., Гордеев В. С., Гришин А. В., Завьялов Н. В., Мысков Г. А., Назаренко С. Т. Обзор сильноточных импульсных ускорителей электронов, созданных в РФЯЦ-ВНИИЭФ на базе ступенчатых линий// Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015. Вып. 20, Ч. 1. С. 172–183.
2. Основные достижения РФЯЦ-ВНИИЭФ 2018. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2019. С. 32–33., С.35–36.

## ВОЗБУЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА РЕНТГЕНОВСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ СИЛЬНОТОЧНОГО РАЗРЯДА

*Д. С. Прохоров, Ю. Н. Долин, А. Е. Калинычев,  
Г. В. Карпов, А. А. Шаталин*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Показана возможность возбуждения электромагнитного импульса рентгеновским излучением сильноточного разряда типа вакуумной искры. Для этого проведена модернизация существующего стенда, выполненного по классической схеме микропинцевого устройства [1] с тригatronным иницированием межэлектродного пробоя. В модернизированном варианте иницирование осуществляется импульсным напуском газа, что позволило почти на два порядка повысить интенсивность генерируемого рентгеновского излучения. Кроме того, проведены изменения зарядных и пусковых схем, использована волоконно-оптическая гальваническая развязка в измерительных цепях. Все это позволило снизить до приемлемого уровня паразитные искажения измеряемых сигналов. Выполнены первые эксперименты по возбуждению электромагнитного импульса рентгеновским излучением сильноточного разряда.

### Список литературы

1. Короп Е. Д., Мейерович Б. Э. и др. Микропинч в сильноточном диоде // Успехи Физических Наук. 1979. Т. 129. Вып. 1. С. 87–112.

## **ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВ НАСТРОЙКИ КРИСТАЛЛОВ KDP ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФАЗОВОГО СИНХРОНИЗМА 1-ГО ТИПА ПРИ ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ НА ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКЕ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

*В. М. Рябцев, А. В. Зубков, А. М. Болтаев,  
В. П. Коваленко, С. А. Макаров*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», ИЛФИ, г. Саров Нижегородской обл.

Проведены измерения углов настройки кристаллов KDP на установке нового поколения для обеспечения фазового синхронизма 1-го типа [1, 2] при генерации второй гармоники рабочего излучения установки ( $\lambda = 1053$  нм). В процессе измерений кристалл поворачивается по углу с шагом 200 мкрад в пределах центрального и первых побочных максимумов преобразования, и в каждой точке измеряется энергия излучения 2-й гармоники. Значения углов настройки для каждого кристалла определяются по положению максимума преобразования излучения во вторую гармонику на угловой кривой синхронизма с учетом температуры кристаллов. Суммарная погрешность измерения не превышает 30 мкрад (внешний угол). Результаты измерений полностью согласуются с полученными ранее результатами [3].

### **Список литературы**

1. Дмитриев В. Г., Тарасов Л. В. Прикладная нелинейная оптика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. С. 512.
2. Гурдазян Г. Г., Дмитриев В. Г., Никогосян Д. Н. – Нелинейно-оптические кристаллы. М., 1991.
3. Рябцев В. М., Зубков А. В., Кедров А. И., Коваленко В. П. Измерение углов настройки кристаллов KDP для обеспечения фазового синхронизма 1-го типа при генерации второй гармоники // 20-я научно-техническая конференция «Молодежь в науке». 2022.

## **ВЛИЯНИЕ ОБЪЕМНОГО ЗАРЯДА НА РЕЖИМ РАБОТЫ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЛОВ**

*Л. Е. Спиркина, Л. А. Ларина, А. Е. Дубинов, Г. Н. Колесов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

При расчете СВЧ-генератора типа лампы обратной волны (ЛОВ) рассчитывают дисперсионную и амплитудно-частотную характеристики для замедляющей структуры, по которой определяются возможные оптимальные частоты генерации и рабочее напряжение, при котором обеспечивается условие синхронизма – совпадение скорости электронов с фазовой скоростью электромагнитной волны в замедляющей структуре при данной частоте.

В мощных релятивистских ЛОВ используется катод со взрывной эмиссией, что приводит к увеличению тока в системе, и соответственно, к росту величины пространственного заряда в ней. Наличие пространственного заряда приводит к провисанию потенциала и падению скорости электронов в пучке, которые необходимо учитывать при расчете режимов работы ЛОВ.

В данной работе для оценки влияния пространственного заряда на режимы работы ЛОВ было проведено численное моделирование методом крупных частиц с помощью программы «Карат» [1]. Был получен диапазон токов, в котором наблюдается наиболее оптимальный режим работы ЛОВ.

### **Список литературы**

1. Tarakanov V. P. User's Manual for Code KARAT. Berkley Res. Associates. Springfield, 1992.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ ДЕТОНАЦИИ  
ПО МЕТОДУ ПРОДОЛЬНОГО КЛИНА.  
ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ВЕЛИЧИНУ КРИТИЧЕСКОЙ  
ТОЛЩИНЫ ДЕТОНАЦИИ НИЗКО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО  
ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА НА ОСНОВЕ ТАТБ**

*А. Е. Тепляков, Е. Б. Смирнов, А. В. Сарафанников, К. М. Просвирнин,  
И. Г. Галиуллин, К. В. Еганов, К. М. Мирошкин*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина»,  
г. Снежинск Челябинской обл.

Критическая толщина детонации – один из определяющих показателей взрывчатых веществ, характеризующий его детонационную способность. Определение критической толщины детонации является не маловажной задачей при разработке, отработке технологии изготовления и контроля качества изготовления серийных и новых взрывчатых веществ (ВВ).

В газодинамическом отделении ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ» определение критической толщины детонации термопластичных ВВ проводится, как правило, по методу продольного клина, обладающего простотой и наглядностью полученных результатов – затухание детонационного процесса фиксируется на плите-отметчике, а также с использованием электроконтактной и фотохронографической метод регистрации.

На величину критической толщины детонации могут оказывать влияние многие факторы, связанные как с химической структурой ВВ, технологией изготовления ВВ, так и физическими параметрами окружающей ВВ среды – материалом ограничивающих оболочек, температурой среды и др.

В настоящей работе проведены исследования по оценки влияния на критическую толщину детонации следующих факторов:

– различных материалов ограничивающих оболочек, отличающихся динамической жесткостью;

– температуры проведения экспериментов в диапазоне изменения от  $-90^{\circ}\text{C}$  до  $+90^{\circ}\text{C}$ ;

– пористости ВВ в диапазоне изменения от  $1^{\circ}$  до  $3^{\circ}$ ;

– доли высокочувствительного взрывчатого наполнителя в смесевом ВВ

В результате проведенных исследований установлено влияние каждого рассмотренного параметра на величину критической толщины детонации, определенной по методу продольного клина.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УЗЛА ВВОДА ВЧ МОЩНОСТИ ДЛЯ УСКОРЯЮЩИХ РЕЗОНАТОРОВ ТЯЖЕЛОИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ НА ЭНЕРГИЮ 4 МЭВ/НУКЛОН

*Д. С. Труфанов, Л. Е. Поляков, М. Л. Сметанин*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ ведутся работы по разработке синхротронного комплекса для исследования воздействия ионизирующих излучений космического пространства на элементы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) [1]. Проектируемый комплекс включает два линейных ускорителя-инжектора, которые формируют основные параметры пучка: источник протонов и легких ионов ЛУ1 и источник тяжелых ионов ЛУ2 [2].

В основной части ЛУ2 используются отдельные индивидуально фазуемые ускоряющие резонаторы с трубками дрейфа, каждый из которых имеет собственное ВЧ питание. В тракте ВЧ транспортировки от генератора к ускоряющей структуре одним из ключевых компонентов является узел ввода ВЧ мощности (УВМ). Это устройство позволяет с минимальными потерями передавать в резонатор ВЧ сигнал. Основным элементом ВЧ тракта – коаксиальный фидер воздушного заполнения.

В работе представлен трехмерный расчет электродинамических характеристик (ЭДХ) узла ввода ВЧ мощности (УВМ) в ускоряющий четвертьволновый и ИН-резонатор, работающие на частоте 81,25 МГц и 162,5 МГц соответственно.

УВМ смоделирован с использованием петли в качестве элемента связи с резонатором. Узел предназначен для работы в качестве устройства, позволяющего связывать питающий ВЧ генератор с ускоряющими резонаторами с трубками дрейфа. УВМ должен обеспечивать уровень согласования с коэффициентом стоячей волны по напряжению  $K_{СВн} \leq 1,1$  подводящего фидера с резонаторами в диапазоне частот 81–82 МГц и 162–163 МГц.

В результате проведенного численного трехмерного моделирования выбрана конструкция УВМ с определенными радиотехническими и электродинамическими характеристиками и рассчитанными основными геометрическими размерами.

### Список литературы

1. Завьялов Н. В. Исследовательские установки РФЯЦ-ВНИИЭФ для экспериментального получения фундаментальных и прикладных знаний в области ядерной, радиационной физики и физики быстропротекающих процессов //Успехи физических наук. 2021. Т. 191, № 9.

2. Будников Д. В. и др. Ядерные и электрофизические установки РФЯЦ-ВНИИЭФ: настоящее и будущее //ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2021. Вып. 4. С. 5.

## **ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОБРАТНОГО КОМПТОНОВСКОГО РАССЕЙНИЯ**

*Е. А. Фролова, К. А. Иванов, А. С. Конкин*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В настоящее время ИЯРФ в рамках тематики НЦФМ участвует в разработке перспективного источника гамма-квантов высокой энергии, основанного на обратном комптоновском эффекте. Источники данного типа отличаются высокой угловой направленностью, яркостью и монохроматичностью излучения, вследствие чего нашли широкое применение в различных областях науки. Для генерации фотонов высокой энергии в данных источниках используется обратное комптоновское рассеяние лазерных фотонов на ультрарелятивистских электронах. В докладе содержится описание физики обратного комптоновского рассеяния и конструкции источника, а также расчетные оценки необходимых параметров лазерной системы на основе полученных параметров электронного пучка разрабатываемой установки.

## РАСЧЕТ ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ МОНИТОРА ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА РАЗРЕЗНОГО ТИПА ТЯЖЕЛО-ИОННОГО СИНХРОТРОНА

*Е. В. Хробостова*<sup>1</sup>, *Л. Е. Поляков*<sup>2</sup>, *А. М. Опекунов*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> СарФТИ НИЯУ МИФИ, г. Саров Нижегородской обл.

<sup>2</sup> ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ ведутся работы по разработке синхротронного испытательного комплекса (СКИ) для проведения радиационных испытаний [1, 2]. В ускорителях разных типов пучки заряженных частиц подвержены группировке, фокусировке, ускорению, охлаждению, транспортировке и т. п. Следствием воздействия внешних возмущений является то, что движение пучка частиц в реальном ускорителе отличается от расчетного. Поэтому существует необходимость контроля параметров пучка, в частности его поперечного положения в процессе ускорения и транспортировки. Для этих целей используются такие устройства как мониторы положения пучка (МПП).

В кольцевых ускорителях комплекса СКИ предполагается использование линейных разрезных МПП. В программе трехмерного электродинамического моделирования построены трехмерные модели линейного разрезного МПП. Приведены результаты расчетов напряжений датчиков при различных параметрах пучка протонов и ионов и при определенных энергиях на каждом этапе ускорения (для протонного пучка: при инжекции в бустер – 7,5 МэВ, при выводе из бустера и в вводе в ОС – 700 МэВ, при выводе из ОС – 4 ГэВ; для пучка ионов висмута  $\text{Bi}^{41+}$ : при инжекции в бустер – 832 МэВ, при выводе из бустера и в вводе в ОС – 7,5 ГэВ, при выводе из ОС – 83 ГэВ).

Полученные в результате расчетов значения напряжений на датчиках МПП при отклонении траектории движения центра масс пучка удовлетворяют точности измерения положения пучка в каналах кольцевых ускорителей СКИ.

### Список литературы

1. Завьялов Н. В. Исследовательские установки РФЯЦ-ВНИИЭФ для экспериментального получения фундаментальных и прикладных знаний в области ядерной, радиационной физики и физики быстропротекающих процессов //Успехи физических наук. 2021. Т. 191, № 9.
2. Будников Д. В. и др. Ядерные и электрофизические установки РФЯЦ-ВНИИЭФ: настоящее и будущее //ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2021. Вып. 4. С. 5.

## РАЗРАБОТКА НИЗКОИНДУКТИВНОГО РАЗРЯДНИКА-ОБОСТРИТЕЛЯ ДЛЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

*А. А. Шаталин, А. Е. Калинычев, Г. В. Карпов,  
Е. В. Краев, Д. С. Прохоров*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В докладе изложены результаты разработки [1] компактного разрядника-обострителя с индуктивностью менее 0,1 нГн, обеспечивающего наносекундную коммутацию мультимегаамперных токов. Оригинальный принцип работы разрядника основан на поэтапном пробое многослойного пленочного изолятора с вложенной фольговой пластиной, находящейся под плавающим потенциалом. Резкое изменение потенциала фольги после одноканального начального самопробоя между фольгой и одним из электродов приводит к многоканальному вторичному пробоею между фольгой и другим электродом. В местах пробоя генерируются кумулятивные плазменные струи, инициирующие формирование сквозных токовых каналов между электродами на заключительном этапе пробоя. В работе описаны технологические приемы создания пленочных макетных сборок, представлены результаты испытаний на специальном высоковольтном стенде. Отработана технология изготовления на их основе разрядника-обострителя на рабочее напряжение до 40 кВ. Созданное устройство испытано при токах ~1,5 МА. Показано, что разработанный разрядник-обостритель обладает наносекундным временем срабатывания и вносит в токовый контур дополнительную индуктивность порядка 0,01 нГн.

### Список литературы

1. Галанова Е. А., Долин Ю. Н., Ивановский А. В. и др. Многоканальный неуправляемый разрядник нового типа для наносекундной коммутации мегамперных токов // Доклады российской академии наук. Физика. Технические науки. 2022. Т. 506, № 2. С. 34–39.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГРАДИЕНТА КОНЦЕНТРАЦИИ ВОДОРОДА НА ГОРЕНИЕ В ЗАМКНУТОМ КАНАЛЕ

*С. А. Яковлев, Е. В. Безгодов, В. В. Стаханов, С. Д. Пасюков,  
А. А. Тараканов, И. А. Попов, М. В. Никифоров*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ» им. академ. Е. И. Забабахина»,  
г. Снежинск Челябинской обл.

В мире происходит развитие технологий водородной энергетики (ВЭ) в различных сферах применения. Водород и воздух (кислород) образуют горючую смесь с наибольшим энерговыделением на единицу массы. Также смесь является одной из наиболее легко воспламеняемых в широком концентрационном диапазоне горючего [1]. Возникновение аварийной ситуации на объектах ВЭ может привести к образованию взрывоопасного водородно-воздушного облака. Воспламенение облака может привести к взрыву с потенциальным нанесением ущерба помещениям, персоналу и близлежащему оборудованию с возможным инцидированием каскадной аварии. Т. е. вопрос обеспечения безопасности на объектах ВЭ является актуальным.

Истечение водорода в помещении или сооружении (каналы, тоннели, трубы) является одним из вероятных аварийных сценариев. В результате истечения в верхней части помещения за счет плавучести водорода образуется стратифицированная водородно-воздушная смесь. Похожий сценарий может произойти и на АЭС при осушении активной зоны реактора [2]. В случае воспламенения водородно-воздушной смеси пламя за счет совокупности процессов (турбулизация, диффузионно-тепловые неустойчивости, неустойчивости Ландау-Дарье и т. д.) может ускориться до скоростей, близких к скорости звука в продуктах горения. Ускорение пламени влечет изменение режима распространения на дефлаграционный, квази-детонационный и детонационный режимы. Распространение горения в таких режимах приводит к образованию ударных волн.

В работе [3], выполненной ранее, командой РФЯЦ-ВНИИТФ проводились экспериментальные исследования влияния градиента водородно-воздушной смеси на скорость фронта пламени, избыточное давление го-

рения. Было замечено, что с увеличением градиента объемной доли водорода избыточное давление горения в смесях со средней объемной долей водорода 9,1–9,4 об. % уменьшается. Зависимость скорости фронта пламени от градиента объемной доли горючего в работе [3] не наблюдалась.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований дефлаграции и детонации водородно-воздушной смеси с вертикальным градиентом объемной доли водорода в закрытом канале с перегородками. Канал имеет квадратное сечение  $0,6 \times 0,6$  м<sup>2</sup> и длину 12 м. Среднее содержание водорода в экспериментах варьировалось от 9 до 15 об. %.

### Список литературы

1. Термодинамика горения и взрыва водорода / Б. Е. Гельфанд [и др.]. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. С. 584.

2. Кириллов И. А., Харитоновна Н. Л., Шарафутдинов Р. Б. и др. Обеспечение водородной безопасности на атомных электростанциях с водоохлаждаемыми реакторными установками. Современное состояние проблемы // Ядерная и радиационная безопасность. 2017. № 2 (48). С. 12.

3. Яковлев С. А., Безгоднов Е. В., Стаханов В. В. и др. Экспериментальные исследования процессов горения стратифицированных и равномерно перемешанных водородно-воздушных смесей в замкнутом объеме / XI научный семинар «Моделирование технологий ядерного топливного цикла» // Сборник материалов. Снежинск: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», 2023. С. 41–42.