# СИБИРСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал Основан в 2006 году

2024. Том 19, № 2

# СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, информационно-коммуникационные технологии			
Саратовских М. С., Зимин А. Н., Саратовских Е. С., Гладков В. М., Орлов А. Ю., Федин П. А., Кулевой Т. В. Создание системы операторского контроля GARNET и распределенной системы управления на основе микросервисной архитектуры			
и применение на ускорителе ТИПр	5		
Физика высоких энергий, ускорителей и высокотемпературной плазмы			
Шерстюк С. П., Переведенцев Е. А., Тимошенко М. В. Когерентные бетатронные колебания при инжекции в накопитель	15		
Денисов В. С., Роговский Ю. А. Развитие методов цифровой обработки сигналов с ВРМ	23		
Абед М. А., Бабаев А. А., Сухих Л. Г. Ошибка калибровки светимости, определяемой методом ван-дер-Мееровского сканирования, возникающая из-за электромаг- нитного взаимодействия пучков с q-гауссовым распределением частиц	33		
Ажгирей И. Л., Байшев И. С., Пикалов В. А., Суманеев О. В. Измерения параметров поля нейтронов мониторами на основе газонаполненных пропорциональных счетчиков	41		
Горбунов И. В., Галчук А. В., Григоренко С. В., Осина Ю. К., Цыганков С. С. Центральная область циклотрона Ц-250	50		
Федин П. А., Прянишников К. Е., Зиятдинова А. В., Козлов А. В., Семячкин В. К., Куйбида Р. П., Кулевой Т. В. Проект установки для одновременного облучения двумя пучками ионов на базе ускорителя ТИПр для имитации нейтронного воз- действия	57		
<i>Максимов А. В., Новоскольцев Ф. Н., Синюков Р. Ю., Янович А. А.</i> Моделирование и измерение эмиттанса пучков ионов углерода в канале радиобиологических исследований на ускорительном комплексе У-70	63		
Бровко О. И., Володин А. А., Лебедев В. А., Сыресин Е. М., Сидорин А. О., Фать- кин Г. А. Работа ВЧ-систем в ходе совместных сеансов бустера и нуклотрона	71		
Воробьев Д. С., Куксанов Н. К., Домаров Е. В., Голубенко Ю. И., Корчагин А. И., Салимов Р. А., Фадеев С. Н., Чакин И. К., Семенов А. В., Лаврухин А. В., Пота- пова Ю. Э. Новейшие модели ускорителей ЭЛВ с энергией до 4 МэВ	80		
Вовченко Е. Д., Козловский К. И., Полозов С. М., Шиканов А. Е., Морозова Е. А., Исаев А. А. О влиянии условий фокусировки на эмиссионную способность ла- зерно-плазменного источника ионов	88		

### Физика жидкости, нейтральных и ионизованных газов

Питеримова М. В., Косинов А. Д., Семёнов, Н. В., Яцких А. А., Шмакова А. В., Ермолаев Ю. Г., Смородский Б. В. Экспериментальное исследование развития волнового поезда в продольном следе в пограничном слое плоской пластины при числе Маха 2,5

# Учебно-методическое обеспечение преподавания физики

Сибирский физический журнал

*Краснопевцев С. Е.* Преобразование Фурье на практикуме по физической оптике в Новосибирском государственном университете 111

# Информация для авторов

119

95



Журнал адресован профессорско-преподавательскому составу университетов, научным работникам, аспирантам и студентам, которые интересуются новейшими результатами фундаментальных и прикладных исследований по различным направлениям физики и физико-технической информатики.

Редакция принимает к опубликованию обзоры и оригинальные научные статьи по тем направлениям физики, которые, главным образом, представлены на кафедрах физического факультета НГУ. Принимаются также к рассмотрению статьи по другим направлениям, если в ходе рецензирова-

ния подтверждается их высокий научный статус.

Мы приглашаем научные коллективы и отдельных авторов направлять к нам для опубли-кования материалы по следующим основным разделам:

- квантовая оптика, квантовая электроника;
- радиофизика и электроника;
- теоретическая и математическая физика;
- физика жидкости, нейтральных и ионизованных газов;
- физика высоких энергий, ускорителей и высокотемпературной плазмы;
- физика твердого тела, полупроводников, наноструктур;
- физика химическая, биологическая и медицинская;
- информатика, информационно-коммуникационные технологии;
- учебно-методическое обеспечение преподавания физики.

Периодичность выхода издания – 4 раза в год. Журнал включен в перечень ВАК выпускаемых в Российской Федерации научных и научно-технических изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук.

# SIBERIAN JOURNAL OF PHYSICS

Scientific Journal Since 2006 In Russan

2024. Volume 19, № 2

# CONTENS

<b>Computer Science, Information-Communication Technologies</b>			
Saratovskikh M. S., Zimin A. N., Saratovskikh E. S., Gladkov V. M., Orlov A. Yu., Fedin P. A., Kulevoy T. V. Management and Operator Control System based on Microservice Architecture and Application on the HIPr Accelerator	5		
High-Energy and Accelerator Physics, Physics of High-Temperature Plasma			
Sherstyuk S. P., Perevedentsev E. A., Timoshenko M. V. Coherent Betatron Oscillations in a Storage Ring at Injection	15		
Denisov V. S., Rogovsky Y. A. Development of Digital Signal Processing Techniques with BPM	23		
<i>Abed M. A., Babaev A. A., Sukhikh L. G.</i> Luminosity calibration bias in van-der-Meer scan due to the beam-beam interaction for q-Gaussian beams	33		
Azhgirey I. L., Bayshev I. S., Pikalov V. A., Sumaneev O. V. Measurements of the Neutron Field Parameters with Monitors based on the Gas-Filled Proportional Counters	41		
Gorbunov I. V., Galchuk A. V., Grigorenko S. V., Osina Y. K., Tsygankov S. S. Central Region of the C-250 Cyclotron	50		
<i>Fedin P. A., Prianishnikov K. E., Ziiatdinova A. V., Kozlov A. V., Semyachkin V. K., Kuibeda R. P., Kulevoy T. V.</i> Design of a Facility for Simultaneous Irradiation with Two Ion Beams based on the HIPR Accelerator for Simulations Neutron Influence	57		
Maksimov A. V., Novoskoltsev F. N., Sinyukov R. Yu., Yanovich A. A. Simulation and Measurement of Carbon Ion Beam Emittance in the Channel of Radiobiological Research at the Accelerator Complex U-70	63		
Brovko O. I., Volodin A. A., Lebedev V. A., Syresin E. M., Sidorin A. O., Fatkin G. A. Operation of Rf Systems During Joint Booster and Nuclotron Sessions	71		
Vorobev D. S., Kuksanov N. K., Domarov E. V., Golubenko Y. I., Korchagin A. I., Salimov R. A., Fadeev S. N., Chakin I. K., Semenov A. V., Lavrukhin A. V., Potapova Y. E. Newest ELV Type Accelerators with up to 4 MeV Energy	80		
Vovchenko E. D., Kozlovskij K. I., Polozov S. M., Shikanov A. E., Morozova E. A., Isaev A. A. On the Effect of Focusing Conditions on the Emission Capacity of a			
Laser-Plasma Ion Source	88		

# Physics of a Fluid, Neutral and Ionized Gases

Piterimova M. V., Kosinov A. D., Semionov N. V., Yatskikh A. A., Shmakova A. V.,	
Yermolaev Y. G., Smorodsky B. V. Experimental Study of the Wave Train Development	
in a Longitudinal Trace in the Fat Plate Boundary Layer at Mach 2.5	95
Educational and Methodical Provision of Teaching of Physics	
Krasnopevtsev S. E. Fourier Transform at the Workshop on Physical Optics of NSU	111

# **Instructions for Contributors**

# **Siberian Journal of Physics**



The magazine is addressed to the faculty of universities, science officers, post-graduate students and students who are interested in the newest results fundamental and applied researches in various directions of physics and physicotechnical computer science.

119

Edition accepts to publication reviews and original scientific articles in those directions of physics which, mainly, are presented on faculties of physical faculty of NSU. Are accepted also to viewing article in other directions if during reviewing their high title proves to be true.

We invite acientific personnel and separate authors to guide to us for publication materials on following basic sections:

- Quantum Optics, Quantum Electronics;
- Radiophysics and Electronics; •
- The theoretical and Mathematical Physics;
- Physics of a Fluid, Neutral and Ionized Gases; •
- High-Energy and Accelerator Physics, Physics of High-Temperature Plasma; •
- Solid-state and Semiconductor Physics, Physics of Nanostructures;
- Chemical, Biological and Medical Physics; •
- Computer Science, Information-Communication Technologies;
- Educational and Methodical Provision of Teaching of Physics

Periodicity of an exit of the edition -4 times a year. The magazine is included in list Higher Attestation Committee of scientific and technical editions in Russian Federation in which the publication of the basic results of dissertations on competition of a scientific degree of the doctor and candidate of sciences is recommended.

> Editor in Chief Andrej V. Arzhannikov Executive Secretary Sofiya A. Arzhannikova

Editorial Board of the Journal

S. V. Alekseenko, A. V. Arzhannikov, A. L. Aseev, S. N. Bagaev, A. E. Bondar S. A. Dzyuba, S. I. Eidelman, V. S. Fadin, V. M. Fomin, A. A. Ivanov, V. A. Volodin, V. V. Kozlov, E. V. Kozyrev

A. V. Latyshev, I. B. Logashenko, V. P. Maltsev, A. G. Pogosov, A. L. Reznik, A. V. Shalagin

V. I. Telnov, S. V. Tsibulya

The seriesis published quarterly in Russian since 2006 by Novosibirsk State University Press

The address for correspondence Physics Department, Novosibirsk State University Pirogov Street 2, Novosibirsk, 630090, Russia Tel. +7 (383) 363 44 25 E-mail address: physics@vestnik.nsu.ru On-line version: http://www.phys.nsu.ru/vestnik/

ISSN 2541-9447 Сибирский физический журнал. 2024. Том 19, № 2 Siberian Journal of Physics, 2024, vol. 19, no. 2

Научная статья

УДК 004.75 DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-5-14

# Создание системы операторского контроля GARNET и распределенной системы управления на основе микросервисной архитектуры и применение на ускорителе ТИПр\*

# Михаил Станиславович Саратовских<sup>1</sup>, Александр Николаевич Зимин<sup>2</sup> Евгения Сергеевна Саратовских<sup>3</sup>, Владимир Михайлович Гладков<sup>4</sup> Андрей Юрьевич Орлов<sup>5</sup>, Петр Алексеевич Федин<sup>6</sup> Тимур Вячеславович Кулевой<sup>7</sup>

НИЦ «Курчатовский институт» Москва, Россия

<sup>1</sup>saratovskikhms@gmail.com
 <sup>2</sup>zimin.niitp@ya.com
 <sup>3</sup>saratovskikh\_evgenia@mail.ru
 <sup>4</sup>gladkov3849@gmail.com
 <sup>5</sup>orlov@itep.ru
 <sup>6</sup>fedin-petr1991@yandex.ru
 <sup>7</sup>kulevoy@itep.ru

#### Аннотация

В статье описаны основные принципы разработки распределенной системы управления (PCУ) и системы операторского контроля GARNET на основе микросервисной архитектуры в рамках работы на кластере высокой доступности. Описано применение системы операторского контроля в качестве компоненты PCУ. Приведены и описаны основные элементы программных компонент операторского контроля и PCУ, а также описан процесс конвейерной сборки и публикации программных средств в рабочую продуктовую среду, реализующий принцип непрерывной интеграции. Представлен механизм взаимодействия ключевых компонент между собой. Продемонстрирован механизм размещения сервисов управления при помощи системы контейнеризации Docker и оркестрации контейнеров Kubernetes. Также показаны примеры сервисов взаимодействия с пользователями в среде разрабатываемой системы операторского контроля GARNET, разделение пользователей по ролям и правам доступа, интеграция сервиса визуализации данных средствами Grafana, описан вектор дальнейшего развития PCУ и средств операторского управления, в частности, возможность использования практики разработки пользовательских web-интерфейсов, используя подход micro frontend. Представлены компоненты и результаты работы прототипа системы, разработанного для взаимодействия с измерительной инфраструктурой линейного ускорителя тяжелых ионов ТИПр (г. Москва, ККТЭФ).

# Ключевые слова

ускоритель заряженных частиц, микросервисы, распределенные системы, системы управления

# Благодарности

Работа выполнена на оборудовании Центра коллективного пользования КАМИКС (http://kamiks.itep.ru/) НИЦ «Курчатовский институт».

<sup>\*</sup>Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

<sup>©</sup> Саратовских М. С., Зимин А. Н., Саратовских Е. С., Гладков В. М., Орлов А. Ю., Федин П. А., Кулевой Т. В., 2024

Для цитирования

Саратовских М. С., Зимин А. Н., Саратовских Е. С., Гладков В. М., Орлов А. Ю., Федин П. А., Кулевой Т. В. Создание системы операторского контроля GARNET и распределенной системы управления на основе микросервисной архитектуры и применение на ускорителе ТИПр // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 2. С. 5–14. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-5-14

# Management and Operator Control System based on Microservice Architecture and Application on the HIPr Accelerator

Mikhail S. Saratovskikh<sup>1</sup>, Alexander N. Zimin<sup>2</sup> Evgeniya S. Saratovskikh<sup>3</sup>, Vladimir M. Gladkov<sup>4</sup>, Andrey Yu. Orlov<sup>5</sup>, Petr A. Fedin<sup>6</sup>, Timur V. Kulevoy<sup>7</sup>

NRC "Kurchatov Institute"

<sup>1</sup>saratovskikhms@gmail.com
 <sup>2</sup>zimin.niitp@ya.com
 <sup>3</sup>saratovskikh\_evgenia@mail.ru
 <sup>4</sup>gladkov3849@gmail.com
 <sup>5</sup>orlov@itep.ru
 <sup>6</sup>fedin-petr1991@yandex.ru
 <sup>7</sup>kulevoy@itep.ru

Abstract

The paper describes the basic principles of developing a distributed control system (DCS) and a GARNET operator control system based on a microservice architecture as part of a high-availability cluster. The application of the operator's control system as a DCS component is described. The main elements of software components of operator control and DCS are presented and described. The process of conveyor assembly and publication of software tools into a working product environment, which implements the principle of continuous integration, is described. The mechanism of interaction of key components among themselves is presented. The mechanism for hosting management services using the Docker containerization system and Kubernetes container orchestration is demonstrated. Examples of services for interaction with users in the environment of the GARNET operator control system being developed, separation of users by roles and access rights, integration of the data visualization service using Grafana are shown. The vector of further development of DCS and operator control tools is described, in particular, the possibility of using the practice of developing user web interfaces using the micro frontend approach. The components and results of the operation of a prototype system designed to interact with the measurement infrastructure of the linear heavy ion accelerator HIPR are presented.

Keywords

charge particle accelerator, microservices, distributed systems, control systems

Acknowledgments

Work was performed using equipment of the KAMICS Center for Collective Use (http://kamiks.itep.ru/) of the National Research Centre "Kurchatov Institute".

For citation

Saratovskikh M. S., Zimin A. N., Saratovskikh E. S., Gladkov V. M., Orlov A. Yu., Fedin P. A., Kulevoy T. V. Management and operator control system based on microservice architecture and application on the HIPr Accelerator. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 2, pp. 5–14 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-5-14

#### Введение

Современные ускорители заряженных частиц, как и прочие исследовательские или промышленные электрофизические установки, являют собой сложную совокупность комплексов устройств, разделенных по назначению, принципу работы и зачастую физически удаленных друг от друга. Данные особенности подсистем установок диктуют требования к системе управления и операторского контроля, которая, работая с распределенными подсистемами ускори-

\_\_\_\_\_7

теля или иного сложного устройства, должна сама отвечать требованиям распределенности и при этом обеспечивать единую точку доступа ко всем данным и к функциям управления электрофизической установкой для своевременного контроля состояния устройств и удобства работы с данными. Одно из существующих решений, к примеру, Tango Controls (https:// www.tango-controls.org), основано на CORBA (common object request broker) (http://omniorb. sourceforge.net/omni42/omniORB/omniORB001.html) – протоколе вызова удаленных процедур, разработанном в 80-х гг. прошлого века. Из-за деталей реализации и общего устаревания данного подхода система управления, основанная на CORBA, обладает большим количеством критических мест и низким потенциалом горизонтального масштабирования. В рамках решения задачи создания гибкой системы управления и операторского контроля задействованы современные подходы к разработке программного обеспечения и его разворачивания в продуктовую среду выполнения. В работе представлены компоненты прототипа системы, разработанного для взаимодействия с измерительной инфраструктурой линейного ускорителя тяжелых ионов ТИПр [1].

# Хранение данных

Прежде всего, необходимо решить задачу оперативного сохранения данных, а также задачу доступности архивных данных. Характер изменения объема получаемых данных во времени отображен на рис.1.



*Puc. 1.* Характер изменения объема данных *Fig. 1.* Dynamic of changes in data volume

Приведенный примерный график соответствует ситуации с неким набором постоянно поступающей фоновой информации о состоянии установки (давление, температура узлов и т. п.) и резким увеличением объема информации при, например, включении импульсного источника электронов. При таком характере получения данных для их оперативного отображения оператору и для потоковой обработки требуется соответствующее хранилище. Традиционные SQL базы данных для этого не подходят, так как при большом количестве записей у подобных баз наблюдаются просадки в производительности при записи новых данных. Было принято решение использовать базы данных (БД) временных рядов, позволяющие сохранять темпы вставки данных вне зависимости от размера базы данных (рис. 2, 3) (https://habr.com/ru/companies/olegbunin/articles/464303).



*Puc. 2.* Сравнение скорости вставки в SQL базу данных и в базу данных временных рядов *Fig. 2.* Comparison of insert speed in SQL database and time series database



*Рис. 3.* Сравнение измеренных характеристик, нормированных на лучший результат в серии тестов с различными базами данных
 *Fig. 3.* Comparison of measured characteristics normalized to the best result in a series of tests with different databases

Исходя из сравнительного анализа БД, в качестве базы для оперативного хранения данных предпочтение было отдано InfluxDB (https://www.influxdata.com/) как хранилищу с наиболее низкой задержкой вставки единичного значения (query time). ClickHouse (https://clickhouse. com/), которая является колоночной базой, в создаваемой системе предполагается использовать в качестве архивного хранилища для удобного доступа пользователей к произвольному набору собранных метрик. В то же время конфигурация электрофизической установки чувствительна к консистентности данных, поэтому все настройки устройств хранятся в реляционной БД.

#### Архитектура системы контроля

Программные средства для управления установками должны предоставлять следующие возможности:

1) прием данных с устройств;

2) обработка данных;

3) сохранение метрик о состоянии системы;

4) предоставление доступа к архивным данным;

5) обеспечение оператора наглядной и оперативной информацией о состоянии системы и ходе проводимых работ;

6) выдача команд для управления устройствами/удаленный вызов процедур;

7) выдача своевременных сигналов о неполадках и изменении состояния измерительной инфраструктуры.

На настоящий момент многие системы управления реализованы в виде приложений-монолитов, т. е. программ, осуществляющих весь набор операций с экспериментальными данными в рамках одной программы. Использование монолитного приложения или же групп подобных приложений небезопасно с точки зрения отказоустойчивости и сложностей в обслуживании, поскольку зачастую в подобных системах невозможно централизованное обновление компонентов. Система операторского контроля и управления GARNET (Generic Automated Research via Network Embedded Tools) создается на основе микросервисной архитектуры [2] (рис. 4). Данный подход позволяет создавать отказоустойчивую и широко масштабируемую систему, состоящую из множества микросервисов – набора программ, каждая из которых предназначена для решения узкоспециализированной задачи, к примеру – предоставление пользовательского интерфейса. Микросервисы запускаются в системе в контейнерах Docker (https://www.docker. com/resources/what-container/), что обеспечивает автономность, мультиплатформенность и возможность итеративного развития программного обеспечения. Помимо этого, система может быть развернута по частям или с неполным набором компонент для тестирования или для работы с ограниченным функционалом.



Рис. 4. Схематичное изображение модулей монолита и системы микросервисов, выполняющей те же задачи Fig. 4. Schematic representation of the monolith modules and microservices system performing the same tasks

Для общения между собой микросервисы используют сетевой программный интерфейс (API – Application Program Interface) или же взаимодействуют посредством отправки сообщений в очереди сообщений или распределенный сетевой журнал. В GARNET для взаимодействия сервисов используется парадигма обмена состоянием (REST API) и запись в распределенный журнал Kafka (https://kafka.apache.org/documentation/#gettingStarted). Состав системы операторского контроля и управления представлен на настоящий момент следующими сервисами:

- 1) сервис обработки пакетов данных с устройств;
- 2) сервис отправки команд на устройства;

- 3) сервис настроек конфигурации установки;
- 4) подсистема анализа данных;
- 5) сервис предоставления пользовательского интерфейса;
- 6) сервис обновления значений на интерфейсе;
- 7) сервис обработки команд, передаваемых пользователем для управления;
- 8) сервис авторизации и предоставления разделенного в правах доступа к подсистемам;
- 9) сервис построения отчетов;
- 10) сервис выдачи уведомлений на интерфейс и целевые устройства;
- 11) сервис сбора логов подсистем.

Работа непосредственно с измерительной инфраструктурой вынесена в отдельную подсистему [3]. Эта подсистема разворачивается на подключаемых к устройствам машинах и взаимодействует с системой управления посредством отправки UDP-пакетов в сервис обработки пакетов и приемом UDP-пакетов от сервиса отправки команд на устройства. Вынесение работы непосредственно с драйверами устройств за пределы системы сервисов обеспечивает безопасное тестирование новых подключаемых устройств и отказоустойчивую работу уже подключенных средств измерения. В настоящий момент UDP-пакеты содержат информацию в формате JSON, в будущем планируется перейти на передачу по UDP-информации в виде Protobuf (https://protobuf.dev/) объектов для ускорения передачи информации по сети и уменьшения времени обработки пакетов. Таким образом, устройства измерительной инфраструктуры взаимодействуют с сервисами GARNET либо напрямую при наличии программируемого передающего устройства, либо посредством первоначального агрегирования/обработки данных на узловой машине с последующей передачей метрик в систему.

### Функционирование в кластере kubernetes

На ускорителе ТИПр на средствах 3-х серверов развернут кластер высокой доступности при помощи программных средств Kubernetes (https://kubernetes.io/docs/tutorials/kubernetes-basics/). Предназначение кластера следующее:

1) управление и запуск контейнеров с сервисами (оркестрация контейнеров);

 масштабирование сервисов при помощи разворачивания дополнительных экземпляров сервисов;

3) контроль состояния сервисов;

4) откат сервисов к предыдущим версиям при возникновении ошибок в работе;

5) распределение сетевой нагрузки между экземплярами сервисов, развернутых на разных серверах (балансировка нагрузки);

6) сбор сведений о состоянии серверов.



*Puc. 5.* Схема кластера Kubernetes, развернутого на серверах ускорителя ТИПр *Fig. 5.* Kubernetes cluster schema, deployed on HIPR servers

Для работы на ускорителе ТИПр используется три сервера: один используется как управляющий (master) и два сервера – в качестве узлов кластера (node). На каждом из узлов (рис. 5) развернуты экземпляры сервисов в контейнерах (pod или «под»), управление развертыванием которых осуществляет планировщик (scheduler). Доступ к API кластера осуществляется при помощи специальной компоненты (api-server), а управление рабочими узлами и подами осуществляется при помощи набора утилит (controller) [4].

Для хранения данных на кластере также развернута файловая система Ceph (https://ceph. com/en/discover/) – программно определяемая распределенная файловая система с открытым исходным кодом, лишенная узких мест и единых точек отказа. Работу данной файловой системы можно сравнить с работой общеизвестного RAID (https://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/ TechRpts/1987/CSD-87-391.pdf) массива, хранящего информацию распределенно сразу на множестве дисков, только в Ceph эти диски находятся на физически разнесенных машинах.

#### Непрерывное развертывание и интеграция

Как уже описывалось выше, одно из весомых преимуществ выбранной микросервисной архитектуры системы управления – возможность итерационно развивать подсистемы и встраивать новые сервисы. Данная возможность реализована при помощи средств автоматизации разворачивания в среде Kubernetes, а также внедрения культуры конвейерной разработки программного обеспечения, что гарантирует публикацию в продуктовую среду кластера протестированный в контейнере сервис. Процесс внедрения нового сервиса / новой версии сервиса состоит из следующих этапов:

1) разработка программного обеспечения на машине разработчика;

2) написание юнит-тестов для нового функционала;

- 3) локальное тестирование;
- 4) разворачивание и тестирование в локальном контейнере в тестовой среде;
- 5) упаковка приложения в контейнер, предназначенный для работы в кластере;

6) публикация контейнера в репозитории контейнеров, который может быть развернут, к примеру, на аппаратных средствах предприятия;

 автоматическое или ручное внесение изменений в локальный конфигурационный файл, где содержатся данные о версиях контейнеров в кластере и настройке сетевого взаимодействия между сервисами;

8) публикация изменений конфигурации кластера в репозиторий;

9) вызов функции затягивания изменений конфигурации на управляющем сервере кластера, после чего, согласно указанным в конфигурационном файле настройкам, сервер сам подтянет из репозитория контейнеров нужные версии и заменит их в продуктовой среде кластера, не останавливая работу сервисов.

Важно отметить, что в момент обновления сервиса кластер сохраняет в рабочем состоянии предыдущую рабочую версию программы [4], разворачивая параллельно новую, затем балансировщик нагрузки переключает поток данных на новую версию и только после подтверждения работоспособности новой версии удаляет старый экземпляр. Таким образом осуществляется непрерывность развертывания и сохранение работоспособности системы с целостностью данных. Выглядит данный процесс довольно громоздко, однако при единоразовой настройке окружения на рабочей машине разработчика многие процессы происходят в автоматическом режиме. Поскольку, как уже отмечалось, разработка каждого сервиса проходит в автономном режиме, есть возможность применять современные средства и актуальные парадигмы при написании программного обеспечения, что позволяет создавать высокоэффективный цифровой продукт на актуализируемом стеке технологий, что также позволяет при необходимости расширять штат сотрудников, набираемых из общего рынка разработчиков, а не из узкого круга специалистов по конкретной системе управления, что в свою очередь, сильно увеличивает жизненный цикл программного обеспечения и так называемый «фактор автобуса» (численный показатель, определяющий количество сотрудников, которых нужно исключить из процесса разработки для того, чтобы создаваемый продукт прекратил развитие/существование).

# Взаимодействие с оператором

Оператор взаимодействует с системой управления посредством работы с интерфейсом web-приложения, которое развернуто в виде сервиса на кластере. Таким образом, рабочей станцией может являться любое устройство в локальной сети кластера, способное запустить браузер или специально разработанный клиент (являющийся по своей сути браузером, но с несколько большими возможностями в контексте работы с системой операторского контроля и управления). Предоставление web-интерфейса снижает расходы на обслуживание рабочих станций операторов, поскольку обновление клиентов, запущенных у операторов, происходит централизованно. Web-приложение реализовано с помощью библиотеки ReactJS (https://react. dev/learn) – современного средства разработки пользовательских интерфейсов, основанного на работе с virtual DOM (https://ru.legacy.reactjs.org/docs/faq-internals.html) – методе отрисовки только изменяющихся частей интерфейса. Пользовательское приложение позволяет работать с такими средствами, как:

1) интерактивная карта оборудования;

2) средства визуализации Grafana (https://grafana.com/grafana/);

3) набор интерфейсов для редактирования конфигурации оборудования;

4) набор интерфейсов для выдачи управляющих команд на устройства и узлы-агрегаторы устройств;

5) конструктор запросов к базе оперативных данных и множество более мелких интерфейсов для различных задач.

Конструктор запросов полезен при тестировании нового оборудования, конструировании собственных панелей отображения метрик, где могут быть представлены результаты измерений сразу со множества устройств на одном экране. При помощи описанных средств предоставляемый пользователям интерфейс может быть настроен для отображения подробных метрик в различных сочетаниях, что позволяет работать с единым интерфейсом всем операторам, задействованным при работах на различных узлах/подсистемах ускорителя или иной установки. При всем вышеперечисленном, при минимальном опыте работать с обственный сервис для, к примеру, обработки специфическим образом архивных данных, для чего в GARNET существует сервис электронной документации по API системы и разрабатывается сервис генерации шаблонов программного обеспечения для специфической обработки данных.

## Дальнейшее развитие

Как было отмечено в начале данной статьи, одним из актуальных направлений развития создаваемой системы является внедрение полноценной поддержки Protobuf, что позволит большие массивы данных, такие как осциллограммы, передавать в сжатом формате, что снизит нагрузку на сеть при большом количестве подобных пакетов данных. Другим актуальным направлением является внедрение практики микрофронтенда (micro frontend) (https://martinfowler.com/ articles/micro-frontends.html) – практики, при которой web-приложение для оператора создается не единой программой, а «слоями», отрисовываемыми в едином пространстве, данный подход призван обеспечить модульность в первую очередь разработки интерфейсов, так как для некоторых систем могут потребоваться очень специфичные инструменты отображения. Помимо этого, на данный момент ведутся работы по встраиванию колоночной базы данных ClickHouse, которая ориентирована на выгрузку больших объемов данных за длительные сроки. Для более удобного разворачивания сервисов уже встроен инструмент Helm (https://helm.sh/docs/), позволяющий взаимодействовать с репозиториями сервисов, будто это привычные пакеты для приложений в Linux-системах или MacOS. Также в ближайшей перспективе – добавление поддержки стандартных протоколов встраиваемых систем, таких как MQTT (https://mqtt. org/mqtt-specification/) и XMPP (http://book.itep.ru/4/45/xmpp.htm), что позволит подключать подобные устройства напрямую в локальную сеть кластера «из коробки», т. е. без написания каких-либо программных обвязок. Для опытных пользователей уже добавлен сервис электронной документации, планируется в дальнейшем поддержка средств Jupyter (https://docs.jupyter. org/en/latest/) – Python фреймворка для анализа данных. Также ведется доработка сервиса построения отчетности сразу в формате для офисных программ для дальнейшего оформления отчетности о проделанной работе в ходе экспериментов.

#### Заключение

Прототип системы операторского управления и контроля GARNET работает и активно развивается, чему способствуют современные практики разработки программного обеспечения и актуальный набор технологий. Контейнеризация сервисов обеспечивает платформонезависимость и может запускаться на любой операционной системе, где есть поддержка виртуализации и контейнеров. Таковыми являются все современные операционные системы, применяемые на серверах и персональных компьютерах, включая AstraLinux (https://astralinux. ru/), что особенно актуально при работе в российских компаниях. Автономность сервисов позволяет в любой момент изменить реализацию и набор используемых средств любого из них без потери работоспособности системы. Автоматизация разворачивания системы делает комфортным и быстрым начало работы с GARNET: достаточно одного конфигурационного файла. Использование актуальных технологий позволяет расширять/набирать штат сотрудников из специалистов, представленных на общем рынке труда, а не искать редких разработчиков конкретной системы. Использование web-приложения для отображения интерфейса снижает накладные расходы на рабочие станции для операторов: в качестве рабочих станций мониторинга можно использовать даже мобильные устройства, подключенные к локальной сети кластера. Дальнейшее развитие системы призвано кратно увеличить функционал системы и номенклатуру устройств, работающих с создаваемой системой без предварительной настройки.

# Список литературы

- 1. Fedin P. A. et al. Simulation Experiments at the Heavy Ion Accelerator HIPr // Physics of Atomic Nuclei. 2022. № 85, Suppl. 2. P. S50–S54.
- 2. Ньюмен С. Создание микросервисов. СПб.: Питер, 2016. 304 с.
- 3. Ньюмен С. От монолита к микросервисам. СПб.: БХВ-Петербург, 2021. 272 с.
- 4. **Ричардсон К.** Микросервисы. Паттерны разработки и рефакторинга. СПб.: Питер, 2019. 544 с.

# References

- 1. Fedin P. A. et al. Simulation Experiments at the Heavy Ion Accelerator HIPr. *Physics of Atomic Nuclei*, 2022, vol. 85, suppl. 2, pp. S50–S54.
- 2. Newman S. Building Microservices. Saint Petersburg, Piter publ., 2016, 304 p.
- 3. Newman S. Monolith to Microservices. Saint Petersburg, BHV-Peterburg publ., 2021, 272 p.
- 4. Richardson C. Microservices Patterns. Saint Petersburg, Piter publ., 544 p.

## Сведения об авторах

Саратовских Михаил Станиславович, инженер Зимин Александр Николаевич, инженер-физик Саратовских Евгения Сергеевна, инженер-физик Гладков Владимир Михайлович, инженер-физик Орлов Андрей Юрьевич, инженер-физик Федин Петр Алексеевич, младший научный сотрудник Кулевой Тимур Вячеславович, доктор технических наук

# Information about the Authors

Mikhail S. Saratovskikh, Engineer Alexander N. Zimin, Engineer-Physicist Evgeniya S. Saratovskikh, Engineer-Physicist Vladimir M. Gladkov, Engineer-Physicist Andrey Yu. Orlov, Engineer-Physicist Petr A. Fedin, Junior Researcher Timur V. Kulevoy, Doctor of Technical Sciences

> Статья поступила в редакцию 11.09.2023; одобрена после рецензирования 14.09.2023; принята к публикации 16.02.2024 The article was submitted 11.09.2023; approved after reviewing 14.09.2023; accepted for publication 16.02.2024

Научная статья

УДК 621.384.6.01 DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-15-22

# Когерентные бетатронные колебания при инжекции в накопитель\*

# Сергей Павлович Шерстюк<sup>1</sup> Евгений Алексеевич Переведенцев<sup>2</sup> Максим Вадимович Тимошенко<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup> Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН Новосибирск, Россия

<sup>1,2</sup>Новосибирский государственный университет Новосибирск, Россия

> <sup>1</sup>S.P.Sherstyuk@inp.nsk.su <sup>2</sup>E.A.Perevedent@inp.nsk.su <sup>3</sup>M.V.Timoshenko@inp.nsk.su

Аннотация

Однооборотная (и односгустковая) инжекция часто происходит при большой интенсивности инжектируемого пучка, по сравнению с циркулирующим. Коллективные эффекты, возникающие благодаря поперечным импедансам, могут ограничить эффективность инжекции.

Были проанализированы условия сохранения дипольного момента при инжекции в присутствии машинной нелинейности, приводящей к расфазировке бетатронных колебаний. Теоретические результаты подкрепляются численным моделированием. Полученные выводы используются для интерпретации поведения реальных дипольных когерентных колебаний, наблюдаемых при инжекции в ВЭПП-2000.

## Ключевые слова

бетатронные колебания, когерентные коллективные эффекты, ВЭПП2000

Для цитирования

Шерстюк С. П., Переведенцев Е. А., Тимошенко М. В. Когерентные бетатронные колебания при инжекции в накопитель // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 2. С. 15–22. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-15-22

<sup>\*</sup>Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

© Шерстюк С. П., Переведенцев Е. А., Тимошенко М. В., 2024

# **Coherent Betatron Oscillations in a Storage Ring at Injection**

Sergey P. Sherstyuk<sup>1</sup>, Evgeny A. Perevedentsev<sup>2</sup> Maksim V. Timoshenko<sup>3</sup>

> <sup>1-3</sup>Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

> > <sup>1,2</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

<sup>1</sup>S.P.Sherstyuk@inp.nsk.su <sup>2</sup>E.A.Perevedent@inp.nsk.su <sup>3</sup>M.V.Timoshenko@inp.nsk.su

Abstract

A single-turn (and single-bunch) injection often operates with an injection portion of high intensity, comparable with that of the circulating bunch. Collective effects due to transverse impedance provide interaction between groups of particles. This interaction may set serious limitations on the injection efficiency.

We analyze the conditions of coherency of the betatron oscillations following the injection, while the beam is subject to decoherence resulting from the machine lattice nonlinearities. The theoretical results are supported by numerical tracking. The conclusions are compared with experimental data on dipole oscillations histories following the VEPP-2000 injection.

Keywords

betatron oscillations, coherent collective effects, VEPP2000

For citation

Sherstyuk S. P., Perevedentsev E. A., Timoshenko M. V. Coherent Betatron Oscillations in a Storage Ring at Injection. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 2, pp. 15–22 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-15-22

#### Введение

Комплекс ВЭПП-2000 состоит из бустера БЭП и коллайдера ВЭПП-2000 (рис.1).

Важная часть работы коллайдера – инжекция из бустера в коллайдер при наличии тока в последнем. В процессе инжектируемый ток может потеряться частично или полностью. Одной из причин может быть когерентная неустойчивость в системе двух пучков. Целью этой работы было построение модели коллективных эффектов, которая улучшит понимание процесса инжекции и может помочь в оптимизации параметров.

На первом этапе работы, в целях упрощения, не рассматривались встречные пучки и движение было искусственно сделано одномерным: горизонтальная и вертикальная бетатронные частоты в эксперименте 0,188 и 0,168.



*Puc. 1.* План ускорительного комплекса ВЭПП-2000 *Fig. 1.* Layout of VEPP-2000 accelerator complex

## 1. Теоретическая модель

Представим две группы частиц (инжектируемую и циркулирующую) макрочастицами-осцилляторами, совершающими одномерные бетатронные колебания с нелинейностью и коллективным взаимодействием. Первая макрочастица имеет координату x и число частиц  $N_a$ , вторая макрочастица имеет координату y и число частиц  $N_b$ . В усредненной форме уравнения движения будут иметь вид:

$$\begin{cases} x'' + v_{\beta}^{2} x = mx^{3} + \Phi N_{b} \cdot (x - y) \\ y'' + v_{\beta}^{2} y = my^{3} + \Phi N_{a} \cdot (y - x). \end{cases}$$
(1)

Будем искать решение пары уравнений (1) в виде медленных переменных:

$$x = a(s)\cos(v_{\beta} \cdot s + \varphi(s))$$
  

$$x = a(s)\cos(v_{\beta} \cdot s + \varphi(s))$$
(2)

После усреднения по периоду быстрых колебаний (при этом были введены новые обозначения нелинейность  $\mu = \frac{3}{8}m$ , когерентный сдвиг на одну частицу, или на единицу тока,  $\delta n = -\frac{\Phi}{2v_{\beta}}$ ) получится система:

$$\begin{cases} a' = -\delta n b N_b sin(\varphi - \psi) \\ b' = \delta n a N_a sin(\varphi - \psi) \\ \varphi' = \mu a^2 + \delta n N_b \left( 1 - \frac{b}{a} cos(\varphi - \psi) \right) \\ \psi' = \mu b^2 + \delta n N_a \left( 1 - \frac{a}{b} cos(\psi - \varphi) \right). \end{cases}$$
(5)

После замены

$$J = a^{2} - b^{2}$$

$$Q = a^{2}N_{a} + b^{2}N_{b}$$

$$\eta = \varphi - \Psi$$
(4)

и новых обозначений,  $N_0 = N_a + N_b$ ,  $\Delta = N_a - N_b$ , система (3) приобретет вид:

$$\begin{cases} J' = -\delta n \sqrt{\left(2Q + J \cdot N_0\right)^2 - \left(J\Delta\right)^2} \sin\left(\eta\right) \\ \eta' = \mu < -\delta n \cdot \Delta + \delta n \frac{2Q\Delta + J\left(N_0^2 - \Delta^2\right)}{\sqrt{\left(2Q - J\Delta\right)^2 - \left(JN_0\right)^2}} \cos(\eta) \\ Q' = 0. \end{cases}$$
(5)

Заменой  $J \rightarrow J \cdot Q$ ,  $\mu \rightarrow \mu/Q$  можно удалить Q из уравнений:

$$\begin{cases} J' = -2\delta n \sqrt{\left(2 - J\Delta\right)^2 - \left(JN_0\right)^2} \sin\left(\eta\right) \\ \eta' = \mu J - \delta n \cdot \Delta + \delta n \frac{2\Delta + J\left(N_0^2 - \Delta^2\right)}{\sqrt{\left(2 - J\Delta\right)^2 - \left(JN_0\right)^2}} \cos(\eta) \end{cases}$$
(6)

ISSN 2541-9447 Сибирский физический журнал. 2024. Том 19, № 2 Siberian Journal of Physics, 2024, vol. 19, no. 2  $\eta = 0; \pi$  – решения первого уравнения системы (6), решения второго уравнения будем называть  $J^*$ . Отдельно заметим, что если  $J_1^* > 0$  – решение при  $\eta = 0$ , то при  $\eta = \pi$  и замене  $\Delta \rightarrow -\Delta$  величина  $-J_1^*$  будет решением. Физически это соответствует замене номеров частиц.

Считая переменные Ји η канонически сопряженными, можно построить гамильтониан:

$$H = \frac{1}{2}\mu J^2 - \delta n \Delta \cdot J - \delta n \sqrt{\left(2 - J\Delta\right)^2 - \left(JN_0\right)^2} \cos(\eta).$$
<sup>(7)</sup>

Если вторым слагаемым можно пренебречь, то фазовый портрет при отрицательных μ получается поворотом «положительного» на π.

На рис. 2 изображены фазовые портреты частицы с амплитудой  $\alpha$ . Это линии уровня гамильтониана (7) в переменных ( $a = \sqrt{\frac{Q + JN_b}{N_a + N_b}}$ ,  $\eta$ ). Положение второй частицы при этом определяется параметром Q на азимуте 0 (в силу определения переменной  $\eta$ ), частица b имеет координаты ( $\sqrt{\frac{Q - a^2N_a}{N_b}}$ , 0). Таким образом, стационарная точка с координатами (J = 0,  $\eta = 0$ ) отвечает совпадению двух макрочастиц, на рис. 2 она выделена синим. Важно отметить, что при  $\mu < 0$  эта точка устойчива, а при  $\mu > 0$  неустойчива, а считается всегда отрицательной.



Рис. 2. Фазовые траектории частицы при разном знаке  $\mu$ : слева  $\mu < 0$ , справа  $\mu > 0$ .Синяя точка соответствует совпадению макрочастиц.Fig. 2. Phase trajectories of macroparticle with different signs of  $\mu$ :  $\mu < 0$  on the left,  $\mu > 0$  on the right.Blue dot marks overlap case.

В окрестности  $J = J^*$  стационарной точки будут фазовые колебания с частотой:

$$v_{\phi}^{2} = \delta n \left( \mu Q \frac{2\Delta + (N_{0}^{2} - \Delta^{2})J^{*}}{\Delta - \left(\frac{\mu Q}{\delta n}\right)J^{*}} + \delta n \left( \left(\Delta - \left(\frac{\mu Q}{\delta n}\right)J^{*}\right)^{2} + N_{0}^{2} - \Delta^{2} \right) \right)$$
(8)

При большой разнице токов  $N_a \ll N_b$ частота колебаний вокруг $J^* = 0$ будет (что совпадает с [1]):

$$\mathbf{v}_{\phi}^{2} = \delta n (2\mu b^{2} \cdot b + \delta n \cdot N_{b}^{2}) \,. \tag{9}$$

ISSN 2541-9447 Сибирский физический журнал. 2024. Том 19, № 2 Siberian Journal of Physics, 2024, vol. 19, no. 2 Для небольших  $N_b$ :

$$\mathbf{v}_{\phi}^2 = 2\delta n\mu b^2 \cdot N_{\phi} \,. \tag{10}$$

Такими колебаниями описывается движение макрочастиц с близкими начальными амплитудами колебаний при условии малости общего тока  $\delta n N_0^2 \ll \mu Q$  и большой разницы токов  $N_a \ll N_b$ .

# 2. Симуляция

Компьютерная симуляция основана на усредненной системе уравнений (3). Положение каждой частицы при этом:  $z = a \cdot e^{i\phi}$ .

Тогда новое положение частицы приближенно можно записать как:

$$z_{1} = \left(a + \tau a'\right)e^{i\phi + i\tau\phi'} = (z_{0} + \tau a'e^{i\phi})e^{i\tau\phi'}$$
(11)

Величины а' и ф' берутся из системы (3):

$$z_{1} = \left(z_{0} - \tau \delta n b N_{b} sin(\varphi - \psi)\right) e^{i\tau \left(\mu a^{2} + \delta n N_{b} \left(1 - \frac{b}{a} cos(\varphi - \psi)\right)\right)}$$
(12)

При взаимодействии с группой одинаковых частиц (суммарный заряд которых  $C_b$ , а число  $N_b$ ) вклады он них суммируются:

$$a' = -\delta n \sum \frac{bC_b}{N_b} \sin(\varphi - \psi) = -\delta n \sum \frac{bC_b}{N_b} \operatorname{Im}\left(e^{i(\varphi - \psi)}\right) = -\delta n \cdot \operatorname{Im}\left(e^{i\varphi} \sum \frac{bC_b}{N_b} e^{-i\psi}\right)$$
(13)

$$\phi' = \mu a^{2} + \delta < \sum_{i} \frac{C_{b}}{N_{b}} \left( 1 - \frac{b_{i}}{a} \cos(\varphi - \psi_{i}) \right) = \mu a^{2} + \delta n \sum_{i} \left( \frac{bC_{b}}{N_{b}} - \frac{bC_{b}}{aN_{b}} Re\left(e^{i(\varphi - \psi_{i})}\right) \right) =$$

$$= \mu a^{2} + \delta n C_{b} - \delta n \operatorname{Re}\left( \frac{1}{ae^{-i\phi}} \sum_{i} \frac{bC_{b}}{N_{b}} e^{-i\psi_{i}} \right)$$
(14)

Величину

$$D = \sum_{i} \frac{b_i C_{bi}}{N_b} e^{i\psi_i}$$

назовем дипольным моментом системы частиц. С учетом этого:

$$a' = -\delta n \cdot \operatorname{Im}\left(e^{i\phi}\overline{D}\right) \tag{15}$$

$$\phi' = \mu a^2 + \delta n N_0 - \delta n \cdot \operatorname{Re}\left(\frac{\overline{D}}{\overline{z_0}}\right)$$
(16)

Шаг симуляции производится путем вычисления величины *D*, а затем вычисления нового положения каждой частицы по правилу (11) с учетом соотношений (15) и (16).

На рис. 3 представлена эволюция в фазовом пространстве начального распределения за 200 отсчетов симуляции. Нелинейность при этом полагается отрицательной.

Так как рассматриваются медленные переменные, то радиус-вектор точки стоит понимать как амплитуду бетатронных колебаний, а азимут – как сдвиг по фазе относительно центра



заряда. Таким образом, амплитуда колебаний дипольного момента (наблюдаемая пикапами) соответствует проекции распределения в фазовом пространстве на горизонтальную ось.

*Рис. 3.* Эволюция начального распределения в бетатронном фазовом пространстве *Fig. 3.* Evolution of an initial distribution in betatron phase-space

Представим себе, что инжекция прошла, как изображено на рис. 3. Среди двух порций по 8000 каждая в начальный момент было 374 точек с модулем больше 4,8 (расстояние в 2 $\sigma$  от центра). В конце симуляции таких уже стало 1487. Это дает возможный механизм потери частиц при инжекции: во время обращения вокруг стационарной точки в фазовом пространстве амплитуда колебаний может расти. И если в момент инжекции обе порции частиц могут помещаться в апертуру, то из-за коллективного взаимодействия эта ситуация меняется.

Для сравнения теоретических выводов с симуляцией проверим выполнение зависимости (10). На рис. 4 представлены симулированные колебания полного дипольного момента при разных значениях интенсивности.



5 units of intensity on the left, 7 units on the right

ISSN 2541-9447 Сибирский физический журнал. 2024. Том 19, № 2 Siberian Journal of Physics, 2024, vol. 19, no. 2 Периоды колебаний равны 50 отсчетам для 5 единиц интенсивности (левый график) и 42 для 7 (правый график), что находится в согласии с (10).

#### 3. Измерения

Для экспериментальной проверки соотношения (10) использовались сигналы с контролирующих инжекцию пикапов. Знак нелинейности при этом был отрицательным, что было проверено серией ударов по пучку малой интенсивности. На рис. 5 – пара характерных сигналов. Левый – зависимость тока в ВЭПП-2000 от номера оборота: в кольце было 86 мА, инжектировали 20 мА, 10 мА было потеряно. Правый – измеренная в этот момент пикапом координата (положение центра заряда).



*Рис. 5.* Слева – зависимость тока в коллайдере от номера оборота. Справа – положение центра заряда.
 *Fig. 5.* Pick up signals of injection. Current vs number of turn on the left, center-of-charge position vs number of turn on the right

Примерно после 2000 оборотов видно установившийся режим колебаний – биения примерно постоянного периода. На рис. 6 зависимость логарифма средней частоты биений от логарифма тока. Наклон прямой подтверждает закон (10).



*Рис. 6.* Зависимость частоты от полного тока в логарифмических координатах *Fig. 6.* Frequency vs current in the double logarithmic scale

#### Выводы

График на рис. 6 подтверждает зависимость  $\sqrt{I}$  для частоты фазовых колебаний в сепаратрисе, в согласии с выбранной моделью. Колебания происходят вблизи стационарной точки с J=0, что говорит о том, что начальные амплитуды колебаний близки. Симуляция подтверждает этот вывод и предсказывает возможный механизм потери частиц в процессе инжекции.

Судя по теоретической зависимости частоты от тока, когерентные сдвиги частот в ВЭПП-2000 малы по сравнению со сдвигами, вызванными нелинейностью.

Существенным ограничением теоретической модели является жесткость макрочастиц, что означает, что выводы лучше всего годятся для небольших размеров пучков по сравнению с амплитудой их колебаний.

# Список литературы

1. Винокуров Н. А., Кулипанов Н. Г., Переведенцев Е. А. Эффект отрицательной массы для нелинейной колебательной системы и его влияние на устойчивость когерентных бетатронных колебаний, препринт ИЯФ 76–88. 1976.

# References

 Vinokurov N. A., Kulipanov N. G., Perevedentsev E. A. "Negative mass effect" for nonlinear oscillating system and its influence on stability of coherent betatron oscillations, Preprint of INP 76–88, 1976.

# Сведения об авторах

Шерстюк Сергей Павлович, магистрант

Переведенцев Евгений Алексеевич, ведущий научный сотрудник

Тимошенко Максим Вадимович, младший научный сотрудник

# Information about the Authors

Sergey P. Sherstyuk, Master Student

Evgeny A. Perevedentsev, Leading Researcher, Associate Professor

Maksim V. Timoshenko, Junior Researcher

Статья поступила в редакцию 15.09.2023; одобрена после рецензирования 20.09.2023; The article was submitted 15.09.2023; approved after reviewing 20.09.2023; accepted for publication 27.02.2024 Научная статья

УДК 025.441.47.02(047.31) DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-23-32

# Развитие методов цифровой обработки сигналов с ВРМ\*

# Вячеслав Сергеевич Денисов<sup>1</sup> Юрий Анатольевич Роговский<sup>2</sup>

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН Новосибирск, Россия

> <sup>1</sup>V.S.Denisov@inp.nsk.su <sup>2</sup>Yu.A.Rogovsky@inp.nsk.su

#### Аннотация

Чтобы обеспечить непрерывность работы коллайдера ВЭПП-2000, необходимо точное измерение бетатронной частоты. Для этого в данной работе предлагается использовать уточняющие Фурье-преобразование методики, такие как интерполяция параболой (метод Гассиора), NAFF и оконные функции. Уточненная частота в дальнейшем используется при построении фазовых портретов пучка для контроля наводок магнитных полей высокого порядка. Кроме того, в работе рассмотрены методы выделения сигнала из смеси для последующего анализа – РСА и ICA. Наконец, для повышения точности определения частоты в работе описана простейшая имплементация фильтра Калмана для повышения точности последующего гармонического анализа. В дополнение ко всему вышеизложенному в работе кратко анализируется метод контроля работы самих датчиков положения пучка.

#### Ключевые слова

ВЭПП-2000, преобразование Фурье, оконные функции, NAFF, интерполяция, PCA, ICA, фильтр Калмана

Для цитирования

Денисов В. С., Роговский Ю. А. Развитие методов цифровой обработки сигналов с ВРМ // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 2. С. 23–32. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-23-32

# **Development of Digital Signal Processing Techniques with BPM**

## Vyacheslav S. Denisov<sup>1</sup>, Yuri A. Rogovsky<sup>2</sup>

Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS Novosibirsk, Russian Federation

> <sup>1</sup>V.S.Denisov@inp.nsk.su <sup>2</sup>Yu.A.Rogovsky@inp.nsk.su

## Abstract

In order to ensure the continuity of operation of the VEPP-2000 collider, accurate measurement of the betatron frequency is necessary. To do this, this work proposes to use methods that refine the Fourier transform, such as parabola interpolation (Gassior method), NAFF and window functions. The refined frequency is subsequently used in construction of phase portraits of the beam to control the interference of high-order magnetic fields. In addition, the work discusses methods for extracting a signal from a mixture for subsequent analysis – PCA and ICA. Finally, to improve the accuracy

<sup>\*</sup>Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

© Денисов В. С., Роговский Ю. А., 2024

of frequency determination, the paper considers the simplest implementation of a Kalman filter to improve the accuracy of subsequent harmonic analysis. In addition to all of the above, the paper briefly discusses a method for monitoring the operation of the beam position monitors themselves.

#### Keywords

VEPP-2000, Fourier transform, window functions, NAFF, interpolation, PCA, ICA, Kalman filter

For citation

Denisov V. S., Rogovsky Yu. A. Development of digital signal processing techniques with BPM. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 2, pp. 23–32 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-23-32

#### Методики уточнения частоты

#### Введение

Для обеспечения непрерывной работы коллайдера необходимо прецизионное измерение частоты бетатронных колебаний пучка частиц. Обычно из спектра колебаний получают значение следующей величины, называемой безразмерной частотой бетатронных колебаний:

$$v_{x}(s) = \frac{1}{2\pi} \int_{s}^{s+C} \frac{ds}{\beta_{x}(s)}.$$

Здесь  $\beta_x(s)$  – бета-функция.

Стандартным и общеприменимым методом получения ее значения из спектра сигнала является дискретное преобразование Фурье (ДПФ):

$$X_n = \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{-\frac{2\pi i k n}{N}},$$

где  $X_n$ , n = 0, ..., N - 1 – комплексные амплитуды синусоидальных сигналов, на которые разложен исходный сигнал, представляющий собой дискретный набор значений  $x_k$ , k = 0, ..., N - 1, N – количество измеренных значений сигнала [1].

При использовании ДПФ наблюдается существенный недостаток, вызванный предполагаемой периодичностью входного сигнала. Преобразование Фурье, как и его дискретный аналог, справедливо для функций бесконечной длины (или для сигналов с бесконечной длительностью, если речь идет о применении в обработке сигналов). При преобразовании сигнала, имеющего конечную длину, он воспринимается как один период функции или сигнала с бесконечной длиной. При этом на стыке периодов возникает разрыв, так как реальный сигнал не периодичен. По этой причине происходит «утечка» мощности из пика в боковые лепестки. Для нивелирования данного эффекта возможно применение уточняющих методик.

#### Методики уточнения частоты

Для ликвидации разрывов в амплитуде сигнала на стыке периодов очень часто используют оконное преобразование Фурье:

$$X_n = \sum_{k=0}^{N-1} x_k w(k-n) e^{-\frac{2\pi i k n}{N}}$$
.

Здесь w(k - n) – специально подобранная оконная функция. Применение подобных функций облегчает идентификацию нужного пика в спектре частот, так как подавляет паразитные сателлиты у пика в спектре [1].

Результаты применения разных оконных функций приведены на рис. 1.



*Puc. 1.* Сравнение Фурье-пиков с различными окнами и без них *Fig. 1.* Comparison of Fourier peaks with and without different windows

Другим методом улучшения дискретного преобразования Фурье является интерполяция многочленом второго порядка (метод Гасиора) [2]:

$$S(\varphi) = a(\varphi - \varphi_m)^2 + h.$$

Через точку максимума Фурье-спектра сигнала и две наиболее близкие к ней строится многочлен второго порядка (парабола), после чего ищется максимум уже этой параболы. Здесь  $\phi_m$  является как раз искомой уточненной частотой.

Совершенно другой метод поиска частоты заключается в том, что выдвигается предположение о близости сигнала к синусоидальному. В таком случае используют метод под названием Numerical Analysis of Fundamental Frequencies (NAFF) [1]. Суть его заключается в том, что при наличии массива длиной N можно построить комплексную функцию вида:

$$F(\alpha) = \sum_{n=1}^{N} x_n e^{i2\pi\alpha n} .$$

Здесь  $x_n$  – это элемент массива данных,  $\alpha$  – аргумент новой комплексной функции. Частоту сигнала определяют решением задачи на нахождение максимума модуля данной функции. При этом можно сразу из определения функции увидеть, что точность нахождения частоты зависит от шага, с которым набирается выборка по новой комплексной функции от  $\alpha$ . Пример NAFF-спектра изображен на рис. 2.



*Puc. 2.* NAFF-спектр *Fig. 2.* NAFF-spectrum

#### Результаты

Для каждого измеренного метода была измерена точность в зависимости от длины сигнала (от 100 до 3000) и амплитуды шума в отношении к амплитуде сигнала в процентах (от 0 до 100). Для иллюстрации в табл. 1 приведены величины ошибок при 500 точках и 50 % уровня шума.

Таблица 1

Ошибки определения частоты

Frequency detection errors

Table 1

1 2				
Метод уточнения	Величина ошибки			
ДПФ	10-3			
Оконные функции	10-3			
Интерполяция	2 * 10-4			
NAFF	3 * 10 <sup>-5</sup>			

Результатом изучения вышеизложенных методов стало программное обеспечение для ускорительного комплекса ВЭПП-2000. Интерфейс программы изображен на рис. 3.



*Рис. 3.* Интерфейс программы для определения бетатронной частоты на коллайдере ВЭПП-2000 *Fig. 3.* Program interface for determining the betatron frequency at the VEPP-2000 collider

В данном программном обеспечении были реализованы все вышеизложенные методики улучшения дискретного преобразования Фурье, а также NAFF. Также программа позволяет производить поиск не во всем диапазоне частот, а лишь в заранее заданных оператором границах, что упрощает работу оператора, а также повышает скорость нахождения частоты.

#### Выделение частот поперечных колебаний пучка частиц

#### Введение

Ввиду наличия множества частот в спектре колебаний пучка (имеющих как физическую природу, так и паразитную) особый интерес представляют методы, которые позволят в дальнейшем автоматизировать выделение нужной частоты. При этом представляется возможным использование того факта, что на кольце коллайдера имеется несколько датчиков, позволяющих получать векторы колебаний пучка.

Далее будут рассмотрены метод главных компонент (principal component analysis, далее PCA) и метод независимых компонент (independent component analysis, далее ICA). Также рассмотрено применение с целью повышения точности рекуррентной фильтрации – фильтра Калмана. Это сильно упростит задачу выделения независимых подкомпонент из начальной смеси, в дальнейшем нужно будет только с требуемой точностью проанализировать спектры выделенных гармоник.

#### Метод главных компонент

Допустим, имеются *n* различных векторов с данными, которые описывают один и тот же сигнал или процесс в разное время и с разных позиций. Далее, из них составляется матрица *M*. Можно произвести ее сингулярное разложение по следующей формуле:

$$M = U \sum V^*.$$

Здесь M – матрица размера  $m \times n$ , где n – количество векторов с данными, m – длина (количество значений) этих векторов; таким образом, матрица может быть прямоугольной. С другой стороны от знака равенства стоят три матрицы ее сингулярного разложения: U – матрица ранга  $n, \Sigma$  – прямоугольная диагональная матрица  $m \times n$ , содержащая сингулярные числа, и  $V^*$  – эрмитово-сопряженная матрица ранга m. Столбцы матриц U и V называются, соответственно, левыми и правыми сингулярными векторами матрицы M [3].

Основная информация о полученном разложении содержится в сингулярных числах. Их квадрат пропорционален дисперсии, которую дает каждая компонента разложения в исходный сигнал. Первые правые сингулярные вектор-столбцы, которые дают наиболее значимый вклад в дисперсию, содержат в себе всю основную информацию об исходном сигнале. Таким образом, они представляют собой очищенный сигнал.

При исследовании метода на зависимость ошибки определения частоты от длины точек, уровня шума и близости частот была получена ошибка порядка 10<sup>-4</sup>.

# Метод независимых компонент

Кроме PCA, основным недостатком которого является ортогональность выделяемых им компонент, существует более общий метод – метод независимых компонент (independent component analysis, ICA) [4].

Данный метод основан на следующей гипотезе: исходный сигнал представляет собой смесь из статистически независимых подкомпонент негауссовой природы. Матрица M, составленная из векторов  $X_i$ , в таком случае, может быть записана следующим образом:

$$M = AS.$$

Здесь *А* – матрица смешивания, а *S* – матрица, составленная из искомых независимых компонент. Задача сводится к поиску обратной к *А* матрицы, которую мы обозначим *W*:

$$S = WM.$$

Основным преимуществом данного метода является в первую очередь то, что он не содержит условия на обязательную ортогональность выделенных подкомпонент – они могут быть под любыми углами по отношению друг к другу. Весомым же недостатком является то, что поиск обратной матрицы *W*, в общем случае, нетривиальная задача.

Пример применения ІСА представлен на рис. 4.



*Fig. 4.* ICA example

При исследовании ICA на зависимость ошибки определения частоты от длины точек, уровня шума и близости частот получили ошибку также порядка 10<sup>-4</sup>.

## Фильтрация сигнала

Шумовая составляющая сигнала, ввиду независимости многих ее составляющих от тока пучка, может вносить весомый вклад в ошибку определения частоты. По этой причине возникла идея предварительно отфильтровать шумы в изначальных сигналах, чтобы снизить влияние шумов на точность. Было решено попробовать использовать фильтр Калмана – эффективный рекурсивный фильтр, позволяющий произвести оценку вектора состояния динамической системы, используя при этом неполные и зашумленные измерения [5].

Пусть R – это приблизительная амплитуда шума, а Q – ковариационное значение процесса. 1. Задаем начальное значение K = 0, AE = 1, параметры Q и R.

2. Получаем новое значение X. Если ошибка |X - K| больше є, то рассчитывается смесь

старого значения фильтра и нового значения из фильтруемых данных:

$$K' = X * n + K * m.$$

Здесь K – это «старое» значение фильтра – отфильтрованный последний элемент из фильтруемых данных, X – текущий элемент, который мы хотим отфильтровать, m и n – константы, подбираемые вручную из условия:

$$m + n = 1.$$

Если  $|X - K| \le \varepsilon$ , то K' = K.

3. Далее необходимо оценить общую ошибку предыдущей итерации ОЕА по формуле:

$$OEA = \sqrt{AE^2 + Q^2}$$

ISSN 2541-9447 Сибирский физический журнал. 2024. Том 19, № 2 Siberian Journal of Physics, 2024, vol. 19, no. 2 4. Далее рассчитывается показатель доверия сторон *H* – именно от него зависит, насколько фильтр будет опираться в оценке на новое значение из фильтруемого вектора, а насколько – на предыдущие значения:

$$H = \frac{OEA^2}{OEA^2 + R^2}$$

5. Далее вычисляется фильтрованное значение на основе предыдущего отфильтрованного, текущего, с которым работает фильтр, а также показателя доверия *H*:

$$K = K' + H(X - K').$$

6. После этого начинается подготовка к следующему шагу фильтра – пересчитывается накопленная ошибка:

$$AE = \sqrt{(1-H) * OEA^2}$$

и переходим на шаг 2.

На рис. 5 показан пример отфильтрованного сигнала с коллайдера: синим цветом оригинальный сигнал с датчиков положения пучка, оранжевым – после обработки фильтром Калмана.

При точном подборе стартовых параметров можно добиться ошибки порядка 10<sup>-5</sup>, что свидетельствует о применимости предварительной фильтрации при работе с сигналами с датчиков положения пучка.



*Рис. 5.* Пример фильтрации сигнала с датчиков положения пучка на коллайдере ВЭПП-2000 *Fig. 5.* An example of filtering a signal from beam position monitors at the VEPP-2000 collider

## Результаты

На основе изученных в данной работе методов выделения независимых компонент из смеси в сигнале и их фильтрации написано программное обеспечение. Оно позволяет оператору получить значение бетатронной, а также при необходимости иных частот, в режиме онлайн. Программа обрабатывает поперечные колебания сразу по обеим осям и выводит на главный экран найденные частоты и спектры подкомпонент. Внешний вид интерфейса приведен на рис. 6.



*Puc. 6.* Интерфейс программы для выделения подкомпонент из сигнала на коллайдере ВЭПП-2000 *Fig. 6.* Program interface for isolating subcomponents from a signal at the VEPP-2000 collider

Кроме того, в процессе развития методов анализа данных был также освоен метод построения фазового портрета при помощи всего лишь одного датчика положения пучка. Пример фазовых портретов показан на рис. 7.



*Puc.* 7. Пример фазовых портретов, полученных на коллайдере ВЭПП-2000 *Fig.* 7. An example of phase portraits obtained at the VEPP-2000 collider

Стандартная методика построения фазовых портретов предполагает, что набег фазы между 2 ВРМ известен, далее, используя этот факт, строится фазовый портрет. Метод, используемый на коллайдере ВЭПП-2000, основан на измерении набега фазы за оборот, что позволяет получить обе координаты фазового пространства, используя при этом лишь один датчик. Используется следующая формула:

$$X' = X_{i+1} - X_i * \cos(2\pi v_x) / \sin(2\pi v_x)$$
.

Здесь *X* – координата пучка, а *X* – импульс.

Это позволяет проводить изучение динамики пучка; например, отличие фазового портрета от окружности показывает проявление нелинейной динамики, которая вызвана нелинейными полями/наводками на пучок.

Help	Save	Read	Exit	
B	PM <sub>0</sub>	1 🖻	Sound	:
B	PM <sub>0</sub>	2 5	Sound	:
B	PM <sub>0</sub>	3 5	Sound	:
B	PM <sub>0</sub>	4 5	Sound	:

Рис. 8. Интерфейс программы для контроля поступления данных с ВРМ и оповещения оператора
 Fig. 8. Program interface for monitoring the receipt of data from BPM and alerting the operator

Кроме того, было разработано ПО для контроля поступления данных с датчиков положения пучка, оповещающее оператора о неполадках. В течение заданного оператором периода программа производит мониторинг на предмет поступления данных. Если данные есть, запускается новый цикл, если же нет – срабатывает оповещение оператора с указанием, с какого именно датчика не приходят данные. Оператор контролирует 2 основных параметра – время цикла мониторинга, а также звуковое оповещение. Интерфейс ПО представлен на рис. 8.

## Список литературы

- 1. Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P. Numerical Recipes. The Art of Scientific Computing. Third edition. N. Y. Cambridge University Press, 2007. 1238 p.
- 2. Gasior M., Gonzalez J. L. Improving FFT frequency measurement resolution by parabolic and gaussian interpolation. Geneva. CERN. AB Division, 2004. 15 p.
- 3. Shlens J. A Tutorial on Principal Component Analysis. N. Y. Center for Neural Science, New York University, 2009. 12 p.
- 4. **Comon P.** Independent component analysis, A new concept? Signal Processing 36, Valbonne Cedex. Elsevier Science B. V, 1994. P. 287–314.
- 5. Анисимов А. С., Чикильдин Г. П., Худяков Д. С. Цифровая обработка сигналов: Учеб. пособие. Новосибирск, НГТУ, 2018. 109 с.

# References

- 1. **Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P.** Numerical Recipes. The Art of Scientific Computing. Third edition. N. Y. Cambridge University Press, 2007, 1238 p.
- 2. Gasior M., Gonzalez J. L. Improving FFT frequency measurement resolution by parabolic and gaussian interpolation. Geneva. CERN. AB Division, 2004, 15 p.
- 3. Shlens J. A Tutorial on Principal Component Analysis. N. Y. Center for Neural Science. New York University, 2009, 12 p.
- 4. **Comon P.** Independent component analysis, A new concept? Signal Processing 36. Valbonne Cedex. Elsevier Science B. V, 1994, pp. 287–314.
- 5. Anisimov A. S., Chikildin G. P., Khudyakov D. S. Digital signal processing: Textbook. Novosibirsk, NSTU, 2018, 109 p. (in Russ.)

# Сведения об авторах

Денисов Вячеслав Сергеевич, аспирант, инженер-исследователь

Роговский Юрий Анатольевич, заведующий научно-исследовательской лабораторией, научный сотрудник

### Information about the Authors

Vyacheslav S. Denisov, Graduate Student, Research Engineer

Yuri A. Rogovsky, Head of the Research Laboratory, Researcher

Статья поступила в редакцию 15.09.2023; одобрена после рецензирования 20.09.2023; принята к публикации 02.11.2023

The article was submitted 15.09.2023; approved after reviewing 20.09.2023; accepted for publication 02.11.2023

Научная статья

УДК 539+519.6 DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-33-40

# Ошибка калибровки светимости, определяемой методом вандермееровского сканирования, возникающая из-за электромагнитного взаимодействия пучков с *q*-гауссовым распределением частиц\*

# Мохамед Атеф Абед<sup>1</sup> Антон Анатольевич Бабаев<sup>2</sup> Леонид Григорьевич Сухих3

Томский политехнический университет Томск, Россия <sup>1</sup>abedmohamed@tpu.ru <sup>2</sup>babaev@tpu.ru <sup>3</sup>Sukhikh@tpu.ru

#### Аннотация

Точность калибровки светимости – важная проблема при эксплуатации коллайдеров, от успешного решения которой зависит точность проводимых экспериментов. В адронных коллайдерах калибровка светимости производится с использованием вандермееровского сканирования, целью которого является измерение перекрытия сталкивающихся пучков. При столкновении двух пучков их электромагнитное взаимодействие приводит к изменению перекрытия и, следовательно, к ошибке калибровки светимости. Как правило, этот эффект учитывается в предположении о гауссовом распределении частиц пучка. Однако известно, что распределение в пучках адронных коллайдеров отличается от гауссова, и, в более общем виде, описывается *q*-гауссовыми функциями. Точный учет электромагнитного взаимодействия становится актуальной задачей при повышении требований к точности измерений светимости (например, в проекте HL-LHC целью является точность 1 %). В данной работе представлена модель электромагнитного взаимодействия пучков с *q*-гауссовым распределение частиц, оценивается влияние этого взаимодействия на калибровку светимости методом вандермееровского сканирования. Вычисления проведены для условий экспериментов CMS и ATLAS.

#### Ключевые слова

*q*-гауссовы пучки, электромагнитное взаимодействие, калибровка светимости, вандермееровское сканирование Финансирование

Фининсирование

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы «Наука» (Проект № FSWW-2023-0003).

Для цитирования

Абед М. А., Бабаев А. А., Сухих Л. Г. Ошибка калибровки светимости, определяемой методом вандермееровского сканирования, возникающая из-за электромагнитного взаимодействия пучков с *q*-гауссовым распределением частиц // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 2. С. 33–40. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-33-40

<sup>\*</sup>Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

© Абед М. А., Бабаев А. А., Сухих Л. Г., 2024

# Luminosity calibration bias in van-der-Meer scan due to the beam-beam interaction for *q*-Gaussian beams

Mohamed A. Abed<sup>1</sup>, Anton A. Babaev<sup>2</sup> Leonid G. Sukhikh<sup>3</sup>

> NR Tomsk Polytechnic University Tomsk, Russian Federation

> > <sup>1</sup>abedmohamed@tpu.ru <sup>2</sup>babaev@tpu.ru <sup>3</sup>Sukhikh@tpu.ru

Abstract

The accuracy of luminosity calibration is an important problem in the operation of colliders, the successful solution of which determines the accuracy of the experiments performed. In hadron colliders, luminosity calibration is performed using van-der-Meer scanning, the goal of which is to measure the overlap of the colliding beams. When two beams collide, their electromagnetic interaction leads to a change in their overlap and, consequently, the luminosity calibration is biased. Typically, this effect is accounted for under the assumption that beams have a Gaussian particle distribution. However, it is known that the particle distribution in hadron collider beams differs from Gaussian and is more generally described by *q*-Gaussian functions. Accurate accounting of electromagnetic interaction becomes an urgent task as the requirements for the accuracy of luminosity measurements increase (for example, in the HL-LHC project the goal is an accuracy of 1 %). This paper presents a model of the electromagnetic interaction of beams with a q-Gaussian distribution of particles, and determines the influence of this interaction on the luminosity calibration using the van der Meer scanning method. Calculations were carried out for beams with conditions of the CMS and ATLA experiments.

Keywords

q-Gaussian beams, electromagnetic interaction, luminosity calibration, van-der-Meer scan

Funding

This work was supported by The Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in part of the Science program (Project No FSWW-2023-0003).

For citation

Abed M. A., Babaev A. A., Sukhikh L. G. Luminosity calibration bias in van-der-Meer scan due to the beam-beam interaction for q-Gaussian beams. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 2, pp. 33–40 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-33-40

#### Введение

Светимость *L* является важнейшей характеристикой коллайдера, определяющей его производительность. Она характеризует интенсивность столкновений частиц. Для ультрарелятивистских частиц при однократном строго встречном столкновении пучков светимость определяется выражением [1]:

$$L(\Delta r_{\perp}) = N_1 N_2 \int \rho_1^{\perp} (r_{\perp} - \Delta r_{\perp}) \rho_2^{\perp} (r_{\perp}) dr_{\perp}.$$
<sup>(1)</sup>

где  $N_{1,2}$  – число частиц в пучках,  $\rho_{1,2}^{\perp}$  – нормализованные поперечные плотности частиц,  $\Delta r_{\perp}$  – поперечное расстояние между орбитами сталкивающихся пучков (разведение пучков). Интеграл в (1), представляющий собой свертку плотностей, называется интегралом перекрытия, и он характеризует вероятность единичного столкновения частиц. В кольцевых коллайдерах выражение (1) следует домножить на частоту столкновений *n*.

В эксперименте светимость определяется косвенно, поскольку интеграл перекрытия не может быть измерен. Для этого используется хорошо известный процесс с измеряемой величиной, так что

$$\mu = \sigma_{vis}L, \qquad (2)$$

где  $\sigma_{vis}$  – калибровочная постоянная, являющаяся характеристикой детектора. В качестве измеряемой величины могут выступать, например, количество треков вторичных частиц или энерговыделение в детекторе.

Калибровка светимости заключается в определении постоянной  $\sigma_{vis}$ . Как следует из (1) и (2), ее можно вычислить как

$$\sigma_{vis} = \frac{1}{N_1 N_2} \frac{\mu_{max}(0,0)}{\Omega(0,0)},$$
(3)

где обозначение (0,0) введено для указания на то, что столкновение пучков является лобовым, т. е. расстояние между их орбитами в поперечной плоскости равно 0, и, соответственно,  $\mu_{max}$  (0,0) является максимальным значением измеряемой величины. Для определения  $\Omega(0,0)$ в адронных коллайдерах обычно используется вандермееровское сканирование [2], когда в специально оптимизированных условиях величина  $\mu$  измеряется как функция расстояния между орбитами пучков. Затем, зная калибровочную постоянную, светимость для произвольных условий можно определить с использованием (2). Вандермееровское сканирование используется в RHIC [3; 4], LHC [5; 6], а также предполагается использование этого метода в NICA [7].

При сближении пучков электромагнитная сила их взаимодействия приводит к смещению пучков как целого, что наблюдается как смещение орбиты пучка (когерентный эффект), а также к возмущению движения отдельных частиц, приводящему к изменению бетатронных частот их колебаний (некогерентный эффект) [8]. Все это оказывает влияние на интеграл перекрытия пучков, и, следовательно, на точность калибровки светимости методом вандермееровского сканирования [9; 10]. Соответственно, необходима коррекция калибровочной константы, учитывающая этот эффект. Например, в LHC, она превышает 1 % [5; 6]. Однако учет указанного взаимодействия проводится в предположении гауссова распределения частиц в пучках. В то же время было показано, что это распределение в адронных коллайдерах отличается от гауссова в связи с рядом явлений, таких как пространственный заряд, внутрипучковое рассеяние, синхротронное излучение, нелинейности магнитного поля; см. например, LHC [11; 12], RHIC [13]. Кроме того, увеличение яркости пучка и, соответственно, уменьшение эмиттанса с одновременным повышением интенсивности (например, в HL-LHC) приведут к еще более выраженным отклонениям распределения частиц от гауссова.

Для повышения точности определения светимости необходимо рассматривать перекрытие пучков, отличающихся от гауссовых. Было показано, что *q*-гауссово распределение предоставляет более точное описание распределения частиц для пучков LHC и HL-LHC [12; 14]. В данной работе рассматривается электромагнитное взаимодействие таких *q*-гауссовых пучков. Получены выражения для полного импульса, полученного пучком при действии на него поля другого пучка. Проведено моделирование вандермееровского сканирования для таких пучков, получены оценки влияния этого эффекта на значение калибровочной постоянной в условиях экспериментов CMS и ATLAS.

#### 1. Электромагнитное взаимодействие *q*-гауссовых пучков

Использование q-гауссовых функций

$$QG(u;q,\sigma) = \frac{1}{C_q \sqrt{(5-3q)\sigma}} e_q \left(\frac{-u^2}{(5-3q)\sigma^2}\right)$$
(4)

позволяет описывать распределения, отличающиеся от гауссова, обладающие как более «тяжелыми» хвостами (q > 1), так и более «легкими» (q < 1). При q = 1 функция (4) является обычной гауссовой функцией. В выражении (4)  $e_q$  так называемая q-экспонента, параметр q определяет вес хвостов распределения (чем больше этот параметр, тем большая часть распределения приходится на хвосты),  $\sigma$  – стандартное отклонение,  $C_q$  – нормировочная постоянная, зависящая от q [15].



*Puc. 1.* Плотность распределения, описываемая *q*-гауссовой функцией при  $\sigma = 100$ и при трех различных q = 0.8; 1 и 1,2 *Fig. 1.* Distribution density described by the *q*-Gaussian function at  $\sigma = 100$  µm at three different tail weights q = 0.8; 1 and 1.2

При сближении двух пучков составляющие их частицы получают отклоняющий импульс вследствие электромагнитной силы, действующей со стороны частиц движущегося навстречу пучка. В дальнейшем предполагается, что сгустки частиц движутся строго навстречу друг другу, частицы во время взаимодействия движутся по параллельным траекториям, направление которых совпадает с общим направлением движения сгустка, смещение частицы за время взаимодействия мало. Для ультрарелятивистской заряженной частицы с зарядом  $Q_2 = Z_2 e$ и поперечными координатами ( $x_p$ ,  $y_p$ ) пересекающей сгусток частиц с плотностью частиц  $\rho_1$ , полученный поперечный импульс  $\Delta p_2$  определяется выражением [9; 16]:

$$\Delta p_2(x_p, y_p) = \frac{Q_2}{c} \int E_1^{\perp}(x_p, y_p, z_p) dz_p = \frac{Z_2 e}{c} E_1(x_p, y_p)$$
(5)

и соответствующий угол отклонения Δθ:

$$\Delta \theta \left( x_p, y_p \right) = \frac{\Delta p_2 \left( x_p, y_p \right)}{p} = \frac{Z_2 e}{pc} E_1 \left( x_p, y_p \right).$$
(6)

Здесь  $E_1^{\perp}(x_p, y_p, z_p)$  – электрическое поле, создаваемое отклоняющим сгустком, перпендикулярное траектории отклоняемой частицы,  $E_1(x_p, y_p)$  – интеграл от этого поля за все время взаимодействия, p – полный импульс отклоняемой частицы. Для эллиптических частиц с гауссовым распределением частиц поле  $E_1$  может быть найдено с помощью формул Бассетти – Эрскина [17] или их обобщения [16]. Для сгустков с q-гауссовым поперечным распределением частиц  $\rho_1(x,y) = QG(x;q_x,\sigma_x)QG(y;q_y,\sigma_y)$  поле  $E_1$  может быть найдено численным интегрированием:

$$E_{1}(x_{p}, y_{p}) = \frac{N_{1}Z_{1}e}{2\pi\epsilon_{o}} \int \int \frac{(x_{p} - x) + (y_{p} - y)}{(x_{p} - x)^{2} + (y_{p} - y)^{2}} QG(x; q_{x}, \sigma_{x}) QG(y; q_{y}, \sigma_{y}) dxdy,$$
(7)

где отклоняющий сгусток имеет  $N_1$  частиц с зарядом  $Z_1e$ .

ISSN 2541-9447 Сибирский физический журнал. 2024. Том 19, № 2 Siberian Journal of Physics, 2024, vol. 19, no. 2
На рис. 2 показан полный импульс, полученный ультрарелятивистским протоном, движущимся в поле пяти различных *q*-гауссовых сгустков одинакового размера (под размером сгустка понимается среднеквадратичное отклонение положения частицы от центра, RMS, root-mean-square) и различного веса хвостов *q* в условиях вандермееровского сканирования, проведенного в экспериментах CMS и ATLAS в 2018 году [10]. Взаимодействие со сгустками с большими *q* приводит к большему переданному импульсу для протона, движущегося вблизи центра отклоняющего сгустка (при  $x_p \leq 1,9\sigma$ ). Напротив, при относительно небольших расстояниях до центра (при  $1,9\sigma \leq x_p \lor \leq 3,5\sigma$ ) больший переданный импульс продуцируется сгустками с меньшим весом хвостов *q*. При достаточно больших расстояниях ( $x_p \gtrsim 3,5\sigma$ ) до центра отклоняющего сгустка различие между переданным импульсом для гауссова и *q*-гауссова сгустков становится пренебрежимо малым (0,02 ÷ 0,03%).



*Рис. 2.* Полный горизонтальный (в направлении *x*) импульс, полученный ультрарелятивистским протоном с импульсом 6499 ГэВ/с при взаимодействии с встречным *q*-гауссовым сгустком, содержащим  $8,5 \times 10^{10}$  протонов такой же энергии, размера (RMS)  $\sigma = 97,1$ . Расчет представлен для пяти различных весов хвостов: q = 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2

*Fig.* 2. The total horizontal (in the x-direction) momentum received by an ultrarelativistic proton with a momentum of 6499 GeV/c when interacting with an oncoming *q*-Gaussian bunch containing  $8,5 \times 10^{10}$  protons of the same energy, size (RMS)  $\sigma = 97,1 \mu m$ . The calculation is presented for five different tail weights: q = 0.8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2

#### 2. Влияние взаимодействия пучков на светимость

Электромагнитное взаимодействие сгустков приводит к ошибке определения светимости методом вандермееровского сканирования, которая может быть оценена из отношения  $R = \Omega_{bb}\Omega_o$  интеграла перекрытия с учетом взаимодействия и без него (это отношение эквивалентно отношению соответствующих светимостей). Для вычисления для гауссовых пучков в [9] был предложен код B\*B, где отклоняющий сгусток представляется непрерывным распределением заряда, а отклоняемый сгусток представляется набором макрочастиц с определенным весом, пропорциональным плотности частиц, распределенным по узлам сетки в фазовом пространстве. Этот код был модифицирован автором (М. А. Абедом) для работы с *q*-гауссовыми распределениями: был имплементирован математический аппарат, приведенный выше.

Помимо отношения R, также была оценена ошибка калибровочной постоянной  $\sigma_{vis}$  (3), возникающая из-за электромагнитного взаимодействия сгустков, которая вычисляется по формуле [10]:

$$\frac{\Delta\sigma_{vis,0}}{\sigma_{vis,0}} = \frac{\sigma_{vis,0b} - \sigma_{vis,0}}{\sigma_{vis,0}} = \frac{\int R(\Delta x, 0)\Omega_o(\Delta x, 0)d\Delta x \times \int R(0, \Delta y)\Omega_o(0, \Delta y)d\Delta y}{R(0, 0)(\int\Omega_o(\Delta x, 0)d\Delta x \times \int\Omega_o(0, \Delta y)d\Delta y)} - 1.$$
(8)

37

ISSN 2541-9447 Сибирский физический журнал. 2024. Том 19, № 2

Siberian Journal of Physics, 2024, vol. 19, no. 2

Для вычислений был использованы параметры программ вандермееровского сканирования в экспериментах CMS и ATLAS 2018 г. (см. табл. 1) [10] в предположении, что пучки имеют q-гауссово распределение частиц. Рассмотрены пять различных весов хвостов: q = 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2.

Таблица 1

# Параметры пучка [10], используемые в расчетах

Table 1

	-			
Количество частиц $N_1 = N_2 = N$	<i>р</i> , ГэВ/с	$(Q_x, Q_y)$	β [см]	Размер сгустка (RMS), мкм
$8,5 \times 10_{10}$	6499	(0,31; 0,32)	19,7	97,1

Beam parameters [10] used in calculations

На рис. 3 показано влияние взаимодействия сгустков на светимость (отношение R) в зависимости от расстояния между орбитами пучков. При малых расстояниях это влияние более значительно для сгустков с большим весом хвостов. Напротив, при больших расстояниях большее (по модулю) отношение R характерно для сгустков с меньшим весом хвостов.



*Рис. 3.* Изменение отношения *R* в зависимости от расстояния между орбитами пучков (beam separation) для *q*-гауссовых пучков (параметры приведены в табл. 1). Поперечный размер сгустков (RMS)  $\sigma = 97,1$  мкм. Расчет представлен для пяти различных весов хвостов: q = 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2 *Fig. 3.* Change in the ratio *R* depending on the distance between the beam orbits (beam separation) for *q*-Gaussian beams (parameters are given in Table 1). Transverse beam size (RMS)  $\sigma = 97,1 \ \mu m$ . The calculation is presented for five different tail weights: q = 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2

Влияние негауссовых хвостов на калибровочную постоянную (8) представлено в табл. 2. Ошибка определения  $\sigma_{vis}$  уменьшается (по абсолютной величине) с ростом веса хвостов q. Следует отметить, что даже для сравнительно малых весов хвостов (отличия q от 1) значение этой ошибки может достаточно заметно отличаться от значения, вычисленного для гауссовых пучков (при q = 1,0).

#### Таблица 2

Ошибка, возникающая из-за электромагнитного взаимодействия пучков при определении калибровочной постоянной методом вандермееровского сканирования для пучков с *q*-гауссовым распределением пучков. Параметры пучка приведены в табл. 1

# Table 2

Luminosity calibration bias due to the electromagnetic interaction of the colliding beams during van-der-Meer scan for beams with q-Gaussian particle distribution. The beam parameters are given in Table 1

Вес хвостов, q	0,8	0,9	1,0 (гауссов пучок)	1,1	1,2
$\Delta \sigma_{_{\it vis}} \sigma_{_{\it vis,0}} [\%]$	-0,268	-0,237	-0,211	-0,158	-0,108

### Заключение

Распределение частиц в сталкивающихся пучках значительно влияет на характер их электромагнитного взаимодействия. В частности, в работе показано (см. рис. 2), что электромагнитное взаимодействие сгустков с негауссовыми хвостами (описываемыми *q*-гауссовыми функциями) заметно отличается от такового для гауссовых пучков. Следствием этого является различный эффект электромагнитного взаимодействия на светимость коллайдеров и абсолютную калибровку светимости (проводимую методом вандермееровского сканирования) для гауссовых пучков и пучков с негауссовыми хвостами.

Целью работы являлось сравнение этого эффекта для гауссовых и q-гауссовых пучков в условиях вандермееровского сканирования, проводимого в условиях экспериментов CMS и ATLAS Большого адронного коллайдера. Постановка задачи объясняется тем, что распределение частиц в реальных пучках, действительно, скорее описывается q-гауссовыми функциями [12; 14], а не является чисто гауссовым. Результаты представлены на рис. 3 и в табл. 2. Показано, что даже если отличие параметра q от 1 (что характеризует отличие распределения от гауссова) не превышает 0,1, оценка влияния электромагнитного взаимодействия на значение калибровочной постоянной может отличаться весьма заметно.

Таким образом, повышение точности определения светимости в коллайдерных экспериментах (например, в проекте HL-LHC заявляется о точности в 1 %) требует использования более реалистичных моделей пучка, нежели гауссовых; модель с использованием *q*-гауссовых функций распределения представляется более подходящей для этих целей.

#### Список литературы / References

- 1. Grafström P., Kozanecki W. Luminosity determination at proton colliders. *Prog. Part. Nucl. Phys.*, 2015, vol. 81, pp. 97148.
- 2. Van-der-Meer S. Calibration of the effective beam height in the ISR. *CERN Technical Report*, 1968, No. CERN-ISRPO-68-31.
- 3. Drees A., White S. Vernier Scan Results from the First RHIC Proton Run at 250 GeV at *Proceedings of International Particle Accelerator Conference*, 2010, P. MOPEC013.
- 4. **Drees A.** Analysis of vernier scans during RHIC Run-13 (pp at 255 GeV/beam). *BNL Technical Report*, 2013, No. BNL102438-2013-IR, C-A/AP/488 (RHIC).

- 5. Sirunyan A. M., Tumasyan A., Adam W. et al. Precision luminosity measurement in protonproton collisions at = 13 TeV in 2015 and 2016 at CMS. *Eur. Phys. J. C*, 2021, no. 81(800).
- 6. Aaboud M., Aad G., Abbott B. et al. Luminosity determination in pp collisions at = 8 TeV using the ATLAS detector at the LHC. *Eur. Phys. J. C*, 2016, no. 76(653).
- 7. Igamkulov Z., Cruceru M., Kurepin A. B., et al. Luminosity Measurement and Control at NICA. *Phys. Part. Nuclei Lett.*, 2019, no. 16(6), pp. 744753.
- 8. Herr W., Pieloni T. Beam-Beam Effects. *CERN Accelerator School: Advanced Accelerator Physics Course*, 2013, pp. 431459.
- 9. Balagura V. Van der Meer scan luminosity measurement and beam–beam correction. *Eur. Phys. J. C*, 2021, no. 81(26).
- Babaev A., Barklow T., Karacheban O., et al. Impact of Beam-Beam Effects on Absolute Luminosity Calibrations at the CERN Large Hadron Collider. arXiv: 2306.10394 [physics.acc-ph], 2023.
- 11. Fitterer M., Stancari G., Alexander V., et al. Effect of a Resonant Excitation on the Evolution of the Beam Emittance and Halo Population. *CERN Technical Report*, 2017, No. CERNACC-NOTE-2017-0037.
- 12. **Timko H., Baudrenghien P., Brunner O., et al.** Operational and beam dynamics aspects of the RF system in 2016 at *Proceedings of 7th Evian Workshop on LHC beam operation*, 2016. p. 193.
- 13. Fedotov A., Gålnanderm, B., Litvinenko V., et al. Experimental studies of the magnetized friction force. *Phys. Rev. E*, 2006, no. 73(6), p. 066503.
- 14. **Papadopoulou P., Antoniou F., Argyropoulos T., et al.** Modelling and measurements of bunch profiles at the LHC. *J. Phys. Conf. Ser*, 2017, no. 874, p. 012008.
- Abed M., Babaev A., Sukhikh L. Luminosity Calibration by Means of Van-Der-Meer Scan for Q-Gaussian Beams. arXiv: 2305.04023 [physics.acc-ph], 2023.
- 16. Babaev A. Coherent Deflection of Elliptic Bunches Colliding at Crossing Angle. arXiv: 2104.02595 [physics.acc-ph], 2021.
- 17. Bassetti M., Erskine G. Closed Expression for the Electrical Field of a Two-dimensional Gaussian Charge. *CERN Technical Report*, 1980, No. CERN-ISR-TH/80-06.

# Сведения об авторах

Абед Мохамед Атеф, аспирант

Бабаев Антон Анатольевич, кандидат физико-математических наук

Сухих Леонид Григорьевич, доктор физико-математических наук

### Information about the Authors

Mohamed Atef Abed, PhD student

Anton A. Babaev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Leonid G. Sukhikh, Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Статья поступила в редакцию 13.09.2023; одобрена после рецензирования 21.09.2023; принята к публикации 20.12.2024

The article was submitted 13.09.2023; approved after reviewing 21.09.2023; accepted for publication 20.12.2024

Научная статья

УДК 53.089 DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-41-49

# Измерения параметров поля нейтронов мониторами на основе газонаполненных пропорциональных счетчиков\*

# Игорь Леонидович Ажгирей<sup>1</sup>, Игорь Сергеевич Байшев<sup>2</sup> Владимир Александрович Пикалов<sup>3</sup>, Олег Валентинович Суманеев<sup>4</sup>

Институт физики высоких энергий им. А. А. Логунова НИЦ «Курчатовский институт» Протвино, Россия

> <sup>1</sup>Igor.Azhgirey@ihep.ru <sup>2</sup>Igor.Baishev@ihep.ru <sup>3</sup>Vladimir.Pikalov@ihep.ru <sup>4</sup>Oleg.Sumaneev@ihep.ru

#### Аннотация

Нейтронные мониторы на основе газонаполненных пропорциональных счетчиков и первые результаты измерений были показаны на RuPAC-2018 и RuPAC-2021. Предполагается использовать эти детекторы для мониторинга стабильности условий проведения сеансов радиационной терапии. Здесь представлены процедура калибровки мониторов на источнике нейтронов AmBe и новые экспериментальные данные. Мониторы были использованы для измерения флюенса нейтронов за защитой экспериментальной установки «Центр коллективного пользования – радиобиологический стенд на углеродном пучке У-70» с энергией пучка ионов 450 МэВ/нуклон. Измерения сопровождались расчетным моделированием с использованием пакета программ CERN FLUKA. Показано хорошее согласие между результатами измерений и расчетов. Даже одиночный монитор со свинцовой вставкой, откалиброванный на AmBe-источнике, позволяет получать хорошие результаты в реальном нейтронном поле. Продемонстрирована возможность оценки флюенса нейтронов с энергией выше 10 МэВ по показаниям пары мониторов. Для улучшения качества измерений необходимо принимать во внимание разницу между условиями калибровки и измерений.

#### Ключевые слова

измерения поля нейтронов, газонаполненные пропорциональные счетчики, моделирование радиационного поля

# Для цитирования

Ажеирей И. Л., Байшев И. С., Пикалов В. А., Суманеев О. В. Измерения параметров поля нейтронов мониторами на основе газонаполненных пропорциональных счетчиков // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 2. С. 41–49. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-41-49

<sup>\*</sup>Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

© Ажгирей И. Л., Байшев И. С., Пикалов В. А., Суманеев О. В., 2024

# Measurements of the Neutron Field Parameters with Monitors based on the Gas-Filled Proportional Counters

# Igor L. Azhgirey<sup>1</sup>, Igor S. Bayshev<sup>2</sup> Vladimir A. Pikalov<sup>3</sup>, Oleg V. Sumaneev<sup>4</sup>

Institute for High Energy Physics named after A. A. Logunov of National Research Center "Kurchatov Institute" Protvino, Russian Federation

> <sup>1</sup>Igor.Azhgirey@ihep.ru <sup>2</sup>Igor.Baishev@ihep.ru <sup>3</sup>Vladimir.Pikalov@ihep.ru <sup>4</sup>Oleg.Sumaneev@ihep.ru

Abstract

Neutron monitors with the gas filled proportional counters inside and first data were presented at RuPAC-2018 and RuPAC-2021 conferences. It is planned to use such devices to monitor the stability of irradiation conditions during radiation therapy sessions. We present here the calibration procedure for these monitors at AmBe neutron source, and the new data. These monitors have been used to measure the neutron fluence behind the shielding of the 450 MeV/nucleon carbon beam based experimental facility "Shared use Center – radiobiological stand with the carbon beam of the U-70 accelerator at IHEP". The measurements were supported by the set of extensive simulations using the CERN FLUKA code. Good agreement between the FLUKA simulations and measurements was shown. Even single monitor with lead insertion calibrated at AmBe neutron source allows to have a good result in the real neutron field. The possibility to estimate the fluence of the high energy neutrons with the energy above 10 MeV using data from the pair of monitors was demonstrated. To improve the quality of the measurements one needs to take into account difference between calibration and measurements conditions.

#### Keywords

neutron field measurements, gas-filled proportional chambers, radiation field simulations

For citation

Azhgirey I. L., Bayshev I. S., Pikalov V. A., Sumaneev O. V. Measurements of the neutron field parameters with monitors based on the gas-filled proportional counters. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 2, pp. 41–49 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-41-49

#### Введение

Нейтронные мониторы на основе GFPC разработаны для измерения флюенса нейтронов на ускорителях. Полученные данные используются для мониторинга радиационных нагрузок на электронику и для проверки эффективности радиационной защиты, а также для бенчмаркинга вычислительных моделей сложных экспериментов [1]. Второе поколение мониторов (GFPC2), предназначенное для работы в полях со значительной фракцией быстрых (с энергией выше 100 кэВ) нейтронов, описано в работах [1; 2]. Чувствительность к различным областям нейтронного спектра определяется структурой материалов, окружающих счетчик. Главная цель нейтронного мониторинга – определение интенсивности жесткой части нейтронного спектра.

Модератор, поглотитель и радиатор для пары мониторов GFPC2 подобраны таким образом, чтобы мониторы имели схожую функцию чувствительности для части нейтронного спектра ниже 100 кэВ, и максимально различную – выше 100 кэВ. Таким образом, пара может работать как простейший 2-групповой спектрометр нейтронов. Монитор, чувствительный к быстрым нейтронам, обозначен как монитор типа А, вспомогательный монитор, используемый для вычитания мягкой части спектра – как монитор В. Мониторы предыдущего поколения, предназначенные для регистрации мягких нейтронов, используются в эксперименте Compact Muon Solenoid (CMS) на Большом адронном коллайдере [3; 4].

Мониторы могут работать без обслуживания длительный период времени. Доступ к ним осуществляется через одиночный коаксиальный кабель, используемый для питания и переда-

чи данных. Мониторы радиационно стойки и не подвергаются воздействию магнитного поля. Результаты предыдущих исследований отклика мониторов приведены в работе [5].

Цель данной работы – продолжение тестирования пары нейтронных мониторов GFPC2 в нейтронном поле на ускорителе заряженных частиц. Проведены измерения флюенса нейтронов с энергией выше 100 кэВ за защитой поглотителя пучка зоны РБС У-70 [6]. Перед измерениями была проведена калибровка мониторов на нейтронном источнике AmBe.

Измерения сопровождались полномасштабным моделированием с использованием программы CERN FLUKA [7; 8].

### 1. Калибровка мониторов

Отклик каждого монитора индивидуален и зависит от типа монитора, характеристик используемого счетчика (толщина слоя бора, эффективность сбора заряда) и настройки порогов внутренней электроники.

Цель калибровки – определение калибровочных коэффициентов  $k_R$  и  $k_{AmBe}$ :

$$k_R = \frac{R}{N}$$
,

где *R* – расчетный отклик идеального монитора в калибровочном поле, *N* – счет реального детектора;

$$k_{AmBe} = \frac{\Phi}{N},$$

где Ф – расчетный флюенс нейтронов в месте положения детектора.

Калибровка выполнена на источнике нейтронов AmBe в открытой геометрии. Спектр источника приведен на рис. 1.



*Puc. 1.* Спектр источника AmBe. Красная линия – данные ISO 8529 [9], синяя – то же в энергетическом представлении программы CERN FLUKA *Fig. 1.* Energy spectrum of AmBe neutron source. Red histogram – ISO 8529 data [9], blue one – the same in the energy binning of the CERN FLUKA code

Расчетный отклик R определялся как число ионов <sup>4</sup>He и <sup>7</sup>Li, попадающих в рабочий объем счетчика. Отклик мониторов R и флюенс нейтронов  $\Phi$  рассчитаны по программе CERN FLUKA.

Результаты расчетов R,  $\Phi$  и измерений N на различном расстоянии от калибровочного источника приведены в табл. 1 для обоих типов мониторов.

Статистическая погрешность расчетов – порядка 0,1 %, измерений – около 1 %. Расчетная оценка погрешности, вносимой рассеянием на оборудовании (крепление источника, подставка под мониторы) – порядка 1 %.

Необходимо учесть вклад фона (рассеянного излучения) в измерения при калибровке мониторов. Учитывая, что основные источники фона (пол, стены и т. д.) расположены на достаточном расстоянии от точек измерений (не менее 6 м), предполагаем, что вклад фона в счет мониторов не зависит от расстояния L от источника до детектора. Тогда суммарный счет Nможно представить как:

$$N(L) = N_0(L) + N_b,$$

где  $N_0(L)$  – «истинный» счет на расстоянии L, а  $N_b$  – фон. В то же время

$$N_0(L) = \frac{R(L)}{k_R} = \frac{\Phi(L)}{k_{AmBe}}$$

 $K_R, K_{AmBe}$  определяются методом наименьших квадратов.

Таблица 1

# Результаты расчетов величин отклика R, флюенса $\Phi$ и измерений счета N для мониторов типа A и B (на 10<sup>6</sup> нейтронов источника). L – расстояние от источника до монитора

Table 1

Results for simulated values of the response R, fluence  $\Phi$ , and experimental values of the count rate N for A and B type monitors (for 10<sup>6</sup> source neutrons). L is the distance from the source to the monitor

<i>L</i> , м	<i>R</i> <sub>A</sub> , ионов/10 <sup>6</sup> нейтронов источника	N <sub>A</sub> , имп./10 <sup>6</sup> нейтронов источника	<i>R</i> <sub>B</sub> , ионов/10 <sup>6</sup> нейтронов источника	N <sub>B</sub> , имп./10 <sup>6</sup> нейтронов источника	Ф, нейтронов/ 10 <sup>6</sup> × см <sup>2</sup>
1,0	9,907	6,826	3,126	2,206	7,994
1,5	4,385	3,201	1,385	1,011	3,531
2,0	2,453	1,909	0,7753	0,591	1,987

В результате калибровки получены следующие калибровочные коэффициенты:

$$k_R^A = 1,52 \pm 0,03$$
  
 $k_{AmBe}^A = 1,23 \pm 0,03$   
 $k_R^B = 1,46 \pm 0,04$   
 $k_{AmBe}^B = 3,73 \pm 0,06$ 

# 2. Измерения

Измерения выполнены в осеннем сеансе 2022 г. за защитой поглотителя зоны РБС ускорителя У-70 ИФВЭ.

Выбор места измерений определялся следующими факторами.

1. Комфортные загрузки детекторов (20 – 100 Гц) позволяют получить приемлемую статистику, и в то же время далеки от предельных, поэтому нет необходимости вводить поправку на мертвое время [5].

2. Тепловые и промежуточные нейтроны, образующиеся и накапливающиеся в зоне РБС, эффективно ослабляются биологической защитой, что позволяет улучшить фоновые условия измерений и значительно повысить достоверность расчетов.

В ходе измерений пучок ионов углерода с номинальной энергией 400 МэВ/нуклон выводился через входной коллиматор зоны РБС на заполненный водой фантом (рис. 2). В качестве фантома использовался заполненный водой прямоугольный резервуар с внутренним размером  $33 \times 35 \times 53$  см, со стенками из поликарбоната. Толщина боковых стенок и дна – 1,5 см, передней и задней стенок – 3 см. Уровень воды в резервуаре – 30 см. Фантом располагался параллельно оси пучка. Центр фантома находился на оси пучка, на расстоянии 380 см от начала входного коллиматора.

Интенсивность пучка определялась по показаниям плоскопараллельной воздушной ионизационной камеры с зазором 3 мм и размерами 200 × 200 мм. Энергия пучка на входе в зону, определенная по результатам измерения распределения профиля энерговыделения в водном фантоме – 378 МэВ/нуклон. Пучок выводился в импульсном режиме, время импульса – 900 мс, время цикла между импульсами – 8 с. Длительность измерений – 286 циклов.



Рис. 2. Расположение оборудования и защиты зоны РБС.
 Пучок приходит с юго-восточного направления на фантом, расположенный в центре зоны
 *Fig. 2.* Layout of the radiobiological stand hardware and shielding.
 Beam is coming from south-east direction on to the phantom, placed in the center of the stand region

Раскрытие коллиматора 150 × 150 мм обеспечивало беспрепятственное пропускание пучка ионов на фантом. Средний радиус пучка на фантоме – около 40 мм.

Пара мониторов располагалась за бетонной защитой, окружающей стальной поглотитель пучка, расположенный в северо-западной зоне РБС. Центры мониторов располагались симме-

трично на расстоянии 15 см относительно оси пучка ионов, расстояние от поверхности защиты – 27 см, высота на 4 см ниже уровня пучка.

Результаты измерений величины N приведены в табл. 3. Статистическая погрешность измерений для монитора А – 0,6 %, монитора В – 1,3 %.

# 3. Расчеты

Расчет отклика мониторов R и флюенса нейтронов  $\Phi$  в условиях измерений выполнен по программе CERN FLUKA [7; 8], версия 4.3-1. Транспорт нейтронов ниже 20 МэВ описан в многогрупповом приближении. Расчетные спектры нейтронов в местах расположения мониторов A и B показаны на рис. 3.

Ввиду сложности набора достаточной статистики для определения отклика мониторов расчет проводился в два этапа – сначала рассчитывался промежуточный источник на цилиндрических поверхностях, окружающих мониторы, затем рассчитывался отклик мониторов от данного источника для разных пороговых энергий нейтронов (см. табл. 2).

Таблица 2

#### Результаты расчетов флюенса $\Phi$ и откликов мониторов *R* (на 10<sup>9</sup> ионов)

Table 2

		-		
Область энергий спектра нейтронов	Ф <sup>а</sup> , нейтронов/ 109 × см <sup>2</sup>	<i>R</i> <sup>A</sup> , ионов/10 <sup>9</sup> нейтронов источника	Ф <sup>в</sup> , нейтронов/ 10 <sup>9</sup> × см <sup>2</sup>	<i>R</i> <sup>в</sup> , ионов/10 <sup>9</sup> нейтронов источника
$E_n < 0,2$ эВ	24,7	0,077	23,8	0,096
<i>E<sub>n</sub></i> < 100 кэВ	44,8	4,21	43,8	2,93
$E_n < 10$ МэВ	78,3	43,1	54,4	23,1
Весь спектр	157,7	125,8	155,5	23,2





E, MeV

Рис. 3. Расчетные спектры нейтронов в местах расположения мониторов (красная линия – позиция монитора А, синяя – монитора В) *Fig. 3.* Simulated neutron spectra at the positions of monitors (red line – at monitor A position, blue line – at monitor B)

Некоторое различие в расчетных значениях флюенса нейтронов обусловлено конфигурацией защиты, в частности смещением стального керна и колодца поглотителя относительно оси пучка (около 3 см в сторону монитора В) – см. рис. 2.

# 4. Анализ результатов

В табл. 3 приведены сравнения основных результатов измерений и расчетов. Представлены измеренный счет N, произведение счета N на калибровочный коэффициент  $k_R$  т. е. восстановленный отклик монитора), расчетный отклик R и произведение счета N на калибровочный коэффициент  $k_{AmBe}$  (т. е. восстановленный флюенс нейтронов), а также расчетные величины флюенса нейтронов  $\Phi$  с энергиями выше 0,2 эВ и 100 кэВ.

Расчетный вклад тепловых нейтронов в показания мониторов пренебрежимо мал, менее 0,5 % для монитора В и менее 0,1 % для монитора А. Расчетный вклад нейтронов с энергией меньше 100 кэВ в показания монитора А, используемого как основной при определении флюенса нейтронов с энергией выше 100 кэВ, составляет 3,3 %.

Таблица 3

							٠
	nontiotitio	1000UTI TOTOD	nacijatod	TT	1121101	ADTITI	3
•	лавноние	DUSVIDIATOR	DACACION	VI.	NUMER	лении	4
	e p mon enne	peoplateres	p				-

Table 3

Величина	А	В	A/B
Счет N × 10 <sup>-9</sup>	73,0	18,9	3,86
$N \times K_R \times 10^{-9}$	110,8	27,5	4,03
$R \times 10^{-9}$	125,8	23,2	5,42
$N  imes K_{AmBe}  imes 10^{-9}$ /см <sup>2</sup>	89,7	70,5	
$\Phi_{E^{>0.2 \textrm{dB}}} \times10^{-9} \textrm{/cm}^2$	133,0	131,7	
$\Phi_{E>100\text{kyB}}\times10^{-9}/\text{cm}^2$	112,9	111,7	

Comparison of the measured and simulated values

Отношение расчетного отклика монитора А к флюенсу нейтронов (за вычетом тепловых) несколько ниже, чем при калибровке, – 0,94 против 1,23, что объясняется разными условиями облучения (угловым распределением нейтронов и энергетическим спектром источника).

Измеренный флюенс нейтронов с энергией более 100 кэВ (по показания монитора А) совпадает с расчетным в пределах 20 %, расчетный отклик мониторов совпадает с измеренным для монитора А в пределах 12 %, для монитора В – в пределах 16 %.

Расчетное отношение откликов мониторов заметно больше измеренных. Можно предположить, что программа моделирования завышает выход вторичных нейтронов с энергией выше 10 МэВ при взаимодействии ядра углерода с энергией порядка 300–400 МэВ/нуклон с веществом, или калибровка ионизационной камеры, примененной в качестве монитора интенсивности пучка, завышает количество ионов углерода, выводимых на фантом. Используя показания двух мониторов, можно провести коррекцию флюенса нейтронов в этом диапазоне энергий:

$$R^{A}_{E>10MeV} = R^{A} - R^{A}_{E<10MeV},$$

или, с учетом того, что  $R^{B}_{E < 10 MeV}$  практически совпадает с  $R^{B}$ ,

$$R^A_{E>10MeV}=R^A-y\times R^B,$$

$$y = \frac{R_{E < 10MeV}^{A}}{R_{E < 10MeV}^{B}} = 1,87.$$

Заменяя расчетный отклик на измеренный, получим:

$$R^{A}_{E>10MeV} = N^{A} \times k^{A}_{R} - 1,87 \times N^{B} \times k^{B}_{R} = 59,4$$

против расчетного 79,3.

С учетом отношения расчетного отклика монитора А для нейтронов с энергией выше 10 МэВ к соответствующему флюенсу, равному 1,04, скорректированный флюенс нейтронов с энергией выше 100 кэВ составит 92,8 × 10<sup>-9</sup> см<sup>-2</sup>.

### Выводы

Продемонстрировано хорошее согласие между измерениями и расчетами. Показана возможность оценки флюенса нейтронов с энергией более 10 МэВ по показаниям двух мониторов. Даже единственный монитор типа А с калибровкой на источнике AmBe позволяет получать вполне достоверные результаты в реальных нейтронных полях. Для повышения точности результатов необходимо учитывать различия между условиями облучения и калибровки.

#### Список литературы / References

- 1. **Dabrowski A., Stickland D., Auzinger G., Pasztor G., Lujan P. et al. (CMS Collaboration).** The Phase-2 Upgrade of the CMS Beam Radiation Instrumentation and Luminosity detectors. CERN, Geneva, CERN-LHCC-2021-008, CMS-TDR-023, 2021.
- Azhgirey I. L., Bayshev I. S., Kurochkin I. A., Pikalov V. A., Sumaneev O. V., Lukanin V. S. Neutron monitors for high energy accelerators. In: *Proceedings of 26<sup>th</sup> Russian Particle Acc. Conf. RuPAC2018*, Ptovino, Russia, 2018, p. 225, DOI:10.18429/JACoW-RUPAC2018-TUP-SA38
- 3. Gribushin A. M. et al. A Neutron Field Monitoring System for Collider Experiments. *Instruments and Experimental Techniques*, 2017, Vol. 60, No. 2, pp. 167–174. DOI: 10.1134/S0020441217020051
- 4. **The CMS Collaboration.** The Phase-2 Upgrade of the CMS Beam Radiation, Instrumentation, and Luminosity Detectors: Conceptual Design. CERN, Geneva, CMS NOTE-2019/008
- Sumaneev O. V., Azhgirey I. L., Baishev I. S., Pikalov V. A. Neutron field Measurements by GFPC based monitors at the Carbon beam at IHEP U-70 proton synchrotron. In: Proceedings of 27th Russian Particle Acc. Conf. RuPAC2021, Alushta, Russia, p. 129, 2021. DOI:10.18429/ JACoW-RuPAC2021-FRC01
- 6. Antipov Yu. M., Britvich G. I., Ivanov S. V. et al. Formation of a transversely flat dose field and the first radiobiological experiments on a carbon beam extracted from the U-70. *Instruments and experimental techniques*, 2015, No. 4, pp. 107–116. (in Russ.)
- 7. Ahdida C. et al. New Capabilities of the FLUKA Multi-Purpose Code. *Frontiers in Physics*, 2022, No. 9, p. 788253.
- 8. **Battistoni G. et al.** Overview of the FLUKA code. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, No. 82, pp. 1018.
- 9. INTERNATIONAL STANDARD ISO 8529-1. Neutron reference radiations fields Part 1: Characteristics and methods of production (ISO 8529-1:2021, IDT).

# Сведения об авторах

**Ажгирей Игорь Леонидович,** кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории **Байшев Игорь Сергеевич,** кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник

Пикалов Владимир Александрович, начальник лаборатории

Суманеев Олег Валентинович, научный сотрудник

# Information about the Authors

Igor L. Azhgirey, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory

Igor S. Bayshev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher

Vladimir A. Pikalov, Head of the Laboratory

Oleg V. Sumaneev, Researcher

Статья поступила в редакцию 28.12.2023; одобрена после рецензирования 12.01.2024; принята к публикации 05.03.2024 The article was submitted 28.12.2023; approved after reviewing 12.01.2024; accepted for publication 05.03.2024 Научная статья

УДК 621.384.633 DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-50-56

# Центральная область циклотрона Ц-250\*

# Илья Васильевич Горбунов<sup>1</sup>, Анатолий Васильевич Галчук Сергей Викторович Григоренко, Юлия Константиновна Осина Сергей Степанович Цыганков

АО «НИИЭФА» Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup>gorbunov@luts.niiefa.spb.su

#### Аннотация

Рассмотрены особенности моделирования центральной области и динамики пучка ионов водорода для циклотрона Ц-250, предназначенного для работы в широком диапазоне регулирования энергии 30–250 МэВ. На основе моделирования динамики пучка ионов в диапазоне регулирования энергии определена оптимальная конфигурация центральной области ускоряющей системы циклотрона Ц-250. В разработанной центральной области выполняются требования по обеспечению достаточной вертикальной фокусировки частиц электрическим полем при захвате пучка в широком фазовом диапазоне. Отклонение центров орбит частиц от геометрического центра циклотрона составляет 2–3 мм для всего диапазона регулирования магнитного поля циклотрона.

#### Ключевые слова

циклотрон, центральная область, динамика пучка, центрирование орбит

#### Для цитирования

Горбунов И. В., Галчук А. В., Григоренко С. В., Осина Ю. К., Цыганков С. С. Центральная область циклотрона Ц-250 // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 2. С. 50–56. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-50-56

# Central Region of the C-250 Cyclotron

# Ilya V. Gorbunov<sup>1</sup>, Anatoly V. Galchuk, Sergey V. Grigorenko Yulia K. Osina, Sergey S. Tsygankov

NIIEFA JSC, St. Petersburg, Russian Federation

1gorbunov@luts.niiefa.spb.su

Abstract

The peculiarities of modeling of the central region and hydrogen ion beam dynamics for the cyclotron C-250 designed for operation in a wide energy control range of 30-250 MeV are considered. On the basis of modeling of ion beam dynamics in the energy control range, the optimal configuration of the central region of the accelerating system of the C-250 cyclotron is determined. The developed central region fulfills the requirements to ensure sufficient vertical focusing of particles by the electric field while capturing the beam in a wide phase range. The deviation of the centres of

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup>Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

<sup>©</sup> Горбунов И. В., Галчук А. В., Григоренко С. В., Осина Ю. К., Цыганков С. С., 2024

particle orbits from the geometric center of the cyclotron is 2-3 mm for the whole range of regulation of the cyclotron magnetic field.

Keywords

Cyclotron, central region, beam dynamics, orbital centering

For citation

Gorbunov I. V., Galchuk A. V., Grigorenko S. V., Osina Y. K., Tsygankov S. S. Central Region of the C-250 Cyclotron. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 2, pp. 50–56 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-50-56

#### Расчетная модель центральной области циклотрона

Разработанная центральная область (рис. 1) циклотрона Ц-250 [1] предназначена для ускорения ионов водорода в широком диапазоне регулирования энергии 30–250 МэВ [2; 3]. Для обеспечения ускорения ионов во всем диапазоне энергий уровень среднего магнитного поля в центральной области должен регулироваться от 0,8 до 1,08 Тл за счет изменения тока основной обмотки. Для формирования изохронного магнитного поля предусмотрены корректирующие обмотки, устанавливаемые как на секторах электромагнита, так и в центральной области [4]. Корректирующие обмотки, располагаемые на секторах, будут иметь возможность изменения первой гармоники магнитного поля для обеспечения оптимального центрирования пучка ионов, а концентрическая обмотка в центре будет обеспечивать создание «бампа» магнитного поля, необходимого для уменьшения потерь в вертикальной плоскости на электродах ускоряющей системы.

Особое внимание уделялось режиму на нижней границе магнитного поля циклотрона, соответствующего энергии ускоренных протонов 125 МэВ, который использовался также для ускорения отрицательных ионов водорода, для обеспечения внешнего пучка протонов в диапазоне 30–125 МэВ, получаемого путем обдирки Н- на радиально перемещаемой фольге.



*Рис. 1.* Центральная область в поперечных сечениях Fig. 1. The central region in cross sections

Разработанный источник ионов типа Пеннинга с холодными катодами генерирует ионы водорода с током извлекаемого пучка ионов до 50 мкА. Расстояние между источником и пуллером составляет 11 мм. 3D-модель центральной области резонансной системы изображена на рис. 2.



*Puc. 2.* 3D-модель ЦО резонансной системы *Fig. 2.* 3D model of the CR of the resonant system

Основные параметры магнитной и ускоряющей систем в центре циклотрона представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры центральной области

Table 1

Parameters	of the	central	region

Параметр	Значение
Угловая протяженность дуантов в центре циклотрона	25°-42°
Апертура дуантов, мм	25
Потенциал на дуантах, кВ	36–72
Кратность ускорения	2
Частота ВЧ-поля, МГц	24–33,2
Радиус установки щели ионного источника, мм	36
Расстояние между ионным источником и пуллером, мм	11
Диапазон изменения индукции магнитного поля в центре, Тл	0,8–1,08



*Рис. 3.* Распределение вектора электрического поля в медианной плоскости *Fig. 3.* Distribution of the electric field vector in the median plane

ISSN 2541-9447 Сибирский физический журнал. 2024. Том 19, № 2 Siberian Journal of Physics, 2024, vol. 19, no. 2 Моделирование центральной области резонансной системы проводилось для половины модели с плоскостью симметрии *XY*. В щели источника на расстоянии 1 мм от внешней стенки

источника ионов задавалась граница плазмы для более точного расчета распределения вектора электрического поля в области щели источника ионов. Источник ионов и плакировки резонансной системы находятся под нулевым потенциалом. Амплитуда ВЧ-напряжения между дуантами и плакировками задалась равной 72 кВ. Результаты моделирования представлены на рис. 3.

#### Моделирование динамики пучка ионов водорода

Моделирование динамики пучка проводилось с помощью программ, созданных в АО «НИИЭФА». Для расчетов использовались трехмерная карта электрического поля и карта магнитного поля в медианной плоскости. Динамика пучка рассчитывалась с фазовым диапазоном частиц на выходе из ионного источника 0,4 радиана и однородным распределением частиц на границе плазмы ионного источника. Результаты расчета для магнитного поля в центре 1,08 Тл представлены на рис. 4. В центре магнита для вертикальной фокусировки пучка (рис. 5) применен «бамп» магнитного поля, равный 80 Гс, который может быть создан как перемещением пробки электромагнита, так и концентрической обмоткой в центре. Оптимальное центрирование пучка (рис. 6) соответствовало дуантному напряжению 72 кВ.



*Puc. 4.* Траектории пучка протонов для режима 250 МэВ в медианной плоскости *Fig. 4.* Proton beam trajectories for the 250 MeV mode in the median plane



*Puc. 5.* Траектории пучка протонов для режима 250 МэВ в вертикальной плоскости *Fig. 5.* Proton beam trajectories for the 250 MeV mode in the vertical plane



*Puc. 6.* Область центров пучка протонов для режима 250 МэВ *Fig. 6.* Area of proton beam centers for the 250 MeV mode

При моделировании динамики пучка на нижней границе магнитного поля циклотрона, соответствующего энергии ускоренных протонов 125 МэВ, напряжение на дуантах было понижено в два раза до 36 кВ для обеспечения подобия орбит в центральной области. Результаты расчета траекторий в вертикальной плоскости и положения центров орбит представлены на рис. 7 и 8 соответственно.



*Puc.* 7. Траектории пучка протонов для режима 125 МэВ в вертикальной плоскости *Fig.* 7. Proton beam trajectories for the 125 MeV mode in the vertical plane



*Puc. 8.* Область центров пучка протонов для режима 125 МэВ *Fig. 8.* Area of proton beam centers for the 125 MeV mode

ISSN 2541-9447 Сибирский физический журнал. 2024. Том 19, № 2 Siberian Journal of Physics, 2024, vol. 19, no. 2

#### Заключение

В работе представлены результаты моделирования 3D-модели центральной области резонансной системы и динамики пучка ускоренных ионов водорода.

В результате численного моделирования динамики пучка разработана модель центральной области, обеспечивающая оптимальное ускорение ионов водорода в полном диапазоне регулирования магнитного поля циклотрона.

Сформированные электрические и магнитные поля в центре циклотрона Ц-250 удовлетворяют требованиям по вертикальной и радиальной фокусировке частиц, центрированию пучка и широкому фазовому диапазону частиц, захваченных в режим ускорения.

### Список литературы

- Горбунов И. В., Галчук А. В., Осина Ю. К., Стогов Ю. И. Расчет центральной области циклотрона Ц-250 // OPENSCIENCE 2022: Сб. тезисов IX Всероссийского молодежного научного форума. Гатчина, 2023. СПб.: Изд-во Петербург. ин-та ядерной физики им. Б. П. Константинова, 2023. С. 59.
- Smirnov K. E., Gavrish Yu. N., Galchuck A. V., Grigorenko S. V., Grigoriev V. I., Klopenkov R. M., Korolev L. E., Kravchuck K. A., Kuzhlev A. N., Mezhov I. I., Mudrolyubov V. G., Osina Yu. K., Stogov Yu. I., Usanova M. V. CYCLOTRON SYSTEM C-250 // RuPAC2021, Alushta, Russia. 27th Russian Particle Acc. Conf. P. 105–107. DOI: 10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRA05.
- Смирнов К. Е., Гавриш Ю. Н., Галчук А. В., Григоренко С. В., Григорьев В. И., Клопенков Р. М., Королёв Л. Е., Кравчук К. А., Кужлев А. Н., Межов И. И., Мудролюбов В. Г., Осина Ю. К., Стогов Ю. И., Усанова М. В. Циклотронный комплекс Ц-250 // Ядерные и электрофизические установки – источники мощных ионизирующих излучений: Сб. тез. докл. науч.-техн. конф. 15–18 июня 2021 г. Снежинск: Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2021. С. 29.
- 4. Osina Yu. K., Ananyeva O. V., Galchuck A. V., Gorbunov I. V., Grigorenko S. V., Mudrolyubov V. G., Smirnov K. E., Stogov Yu. I. Modeling of Magnetic Field and Dynamics of H–, H+ Ions for the Cyclotron C-250. Phys. Part. Nuclei Lett. 2023. No. 20. P. 846–849.

#### References

- Gorbunov I. V., Galchuk A. V., Osina Y. K., Stogov Y. I. Calculation of the central region of the C-250 cyclotron. *OPENSCIENCE 2022 Collection of abstracts of IX All-Russian Youth Scientific Forum*. Gatchina, 2023. Publisher: Federal State Budgetary Institution "St. Petersburg Institute of Nuclear Physics named after B. P. Konstantinov National Research Institute of Nuclear Physics". B. P. Konstantinov National Research Center "Kurchatov Institute" (Gatchina), p. 59. (in Russ.)
- Smirnov K. E., Gavrish Yu. N., Galchuck A. V., Grigorenko S. V., Grigoriev V. I., Klopenkov R. M., Korolev L. E., Kravchuck K. A., Kuzhlev A. N., Mezhov I. I., Mudrolyubov V. G., Osina Yu., Stogov Yu. I., Usanova M. V. CYCLOTRON SYSTEM C-250. RuPAC2021, Alushta, Russia. 27th Russian Particle Acc. Conf. doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRA05, pp. 105–107.
- Smirnov K. E., Gavrish Yu., Klopenkov R. M., Korolev L. E., Kravchuk K. A., Kuzhlev A. N., Mezhov I. I., Mudroliubov V. G., Osina Yu. K., Stogov Yu. I., Usanova M. V. Cyclotron complex C-250. Nuclear and Electrophysical Facilities Sources of Powerful Ionizing Radiation: Collection of Abstracts of Scientific and Technical Conference June 15-18, 2021. Snezhinsk: RFNC-VNIITF Publishing House, 2021, p. 29. (in Russ.)

 Osina Yu. K., Ananyeva O. V., Galchuck A. V., Gorbunov I. V., Grigorenko S. V., Mudrolyubov V. G., Smirnov K. E., Stogov Yu. I. Modeling of Magnetic Field and Dynamics of H<sup>-</sup>, H<sup>+</sup> ions for the Cyclotron C-250. Phys. *Part. Nuclei Lett.*, 2023, no. 20, pp. 846–849.

# Сведения об авторах

Горбунов Илья Васильевич, аспирант, инженер-исследователь 2-й категории Галчук Анатолий Васильевич, ведущий научный сотрудник Григоренко Сергей Викторович, кандидат технических наук, начальник лаборатории Осина Юлия Константиновна, кандидат технических наук, начальник лаборатории Цыганков Сергей Степанович, ведущий исследователь

# Information about the Authors

Ilya V. Gorbunov, Graduate Student, Research Engineer

Anatoly V. Galchuk, Leading Researcher

Sergey V. Grigorenko, Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory

Yulia K. Osina, Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory

Sergey S. Tsygankov, Lead Researcher

Статья поступила в редакцию 13.09.2023; одобрена после рецензирования 15.09.2023; принята к публикации 12.01.2024

The article was submitted 13.09.2023; approved after reviewing 15.09.2023; accepted for publication 12.01.2024

Научная статья

УДК 621.384.6 DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-57-62

# Проект установки для одновременного облучения двумя пучками ионов на базе ускорителя ТИПр для имитации нейтронного воздействия\*

# Петр Алексеевич Федин<sup>1</sup>, Кирилл Евгеньевич Прянишников<sup>2</sup> Альбина Валерьевна Зиятдинова<sup>3</sup>, Александр Владимирович Козлов<sup>4</sup> Вячеслав Кириллович Семячкин<sup>5</sup>, Ростислав Петрович Куйбида<sup>6</sup> Тимур Вячеславович Кулевой<sup>7</sup>

НИЦ «Курчатовский институт» Москва, Россия

> <sup>1</sup>fedin-petr1991@yandex.ru <sup>2</sup>pryanishnikovk@bk.ru <sup>3</sup>albina.ziyatdinova@itep.ru <sup>4</sup>kozlov@itep.ru <sup>5</sup>semyachkin@itep.ru <sup>6</sup>kuibeda@itep.ru <sup>7</sup>kulevoy@itep.ru

#### Аннотация

Ионный ускоритель – это многофункциональный инструмент, который, в том числе, может быть использован для моделирования эффектов нейтронного облучения в реакторных материалах. Под действием нейтронов в конструкционных материалах ядерных установок возникают дефекты кристаллической решетки и происходит накопление продуктов трансмутации (гелия и водорода) в структуре материала. В Курчатовском комплексе теоретической и экспериментальной физики (ККТЭФ) ускоритель тяжелых ионов ТИПр (тяжелоионный прототип) используется для моделирования радиационных повреждений в сталях и сплавах с помощью пучка ионов Fe<sup>2+</sup> 5,6 МэВ. Для одновременной имплантации гелия (или водорода) в область дефектов на установке ТИПр проектируется второй канал, обеспечивающий пучок ионов гелия с энергией до 300 кэВ. В статье представлено описание проектируемой установки.

#### Ключевые слова

ионное облучение, моделирование радиационных повреждений, тяжелые ионы

#### Благодарности

Работа выполнена на оборудовании Центра коллективного пользования КАМИКС (http://kamiks.itep.ru/) НИЦ «Курчатовский институт».

### Для цитирования

Федин П. А., Прянишников К. Е., Зиятдинова А. В., Козлов А. В., Семячкин В. К., Куйбида Р. П., Кулевой Т. В. Проект установки для одновременного облучения двумя пучками ионов на базе ускорителя ТИПр для имитации нейтронного воздействия // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 2. С. 57–62. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-57-62

<sup>\*</sup>Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

<sup>©</sup> Федин П. А., Прянишников К. Е., Зиятдинова А. В., Козлов А. В., Семячкин В. К., Куйбида Р. П., Кулевой Т. В., 2024

# Design of a Facility for Simultaneous Irradiation with Two Ion Beams based on the HIPR Accelerator for Simulations Neutron Influence

Petr A. Fedin<sup>1</sup>, Kirill E. Prianishnikov<sup>2</sup>, Albina V. Ziiatdinova<sup>3</sup> Alexander V. Kozlov<sup>4</sup>, Vyacheslav K. Semyachkin<sup>5</sup>, Rostislav P. Kuibeda<sup>7</sup> Timur V. Kulevoy<sup>8</sup>

> NRC "Kurchatov Institute", Moscow, Russian Federation 1fedin-petr1991@yandex.ru

> > <sup>1</sup>fedin-petr1991@yandex.ru <sup>2</sup>pryanishnikovk@bk.ru <sup>3</sup>albina.ziyatdinova@itep.ru <sup>4</sup>kozlov@itep.ru <sup>5</sup>semyachkin@itep.ru <sup>6</sup>kuibeda@itep.ru <sup>7</sup>kulevoy@itep.ru

#### Abstract

Ion accelerator facility is a powerful tool to simulate neutron irradiation effects in reactor materials. Defects in the crystal lattice arise and the accumulation of transmutation products (helium and hydrogen) occurs in the structure of the material under the action of neutrons in the structural materials of nuclear installations. At Kurchatov Complex for Theoretical and Experimental Physics the heavy ion accelerator HIPr (heavy ion prototype) is used to simulate radiation damage in steels and alloys using a 5.6 MeV Fe<sup>2+</sup> ion beam. The second beam line is designed at the HIPr facility to simultaneously implant helium (or hydrogen) into the region of defects. The second beam line provides a beam of helium ions with energy up to 300 keV. The report presents a description of second beam line design and a status of construction the second beam line.

#### Keywords

Ion irradiation, radiation damage simulations, heavy ions

#### Acknowledgments

Work was performed using equipment of the KAMICS Center for Collective Use (http://kamiks.itep.ru/) of the National Research Centre "Kurchatov Institute".

#### For citation

Fedin P. A., Prianishnikov K. E., Ziiatdinova A. V., Kozlov A. V., Semyachkin V. K., Kuibeda R. P., Kulevoy T. V. Design of a facility for simultaneous irradiation with two ion beams based on the HIPR accelerator for simulations neutron influence. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 2, pp. 57–62 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-57-62

#### Введение

Разработка конструкционных материалов для нового поколения ядерных и термоядерных энергетических установок (реакторов) требует понимания свойств материалов и изменений микроструктуры в результате нейтронного облучения. Ионное облучение может вызвать микроструктурные изменения, наблюдаемые в нейтронно-облученных материалах (дислокационные петли, полости, сегрегация растворенных веществ и т. д.), что используется для имитации нейтронного воздействия на материалы ядерных реакторов [1]. В сравнении с нейтронным, имитационное ионное облучение позволяет получать экспериментальные результаты влияния на микроструктуру материала в существенно быстрый срок – десятки часов вместо десятков лет. Также имитационное ионное облучение имеет преимущества в отсутствии активации материала и в точном контроле за условиями облучения (температура, флюенс и т. д.). Для сравнения уровня повреждений с различным нейтронным спектром и при облучении различными частицами используется подсчет количества смещений атомов, создаваемых на атом решетки [сна].

С 2009 г. ускоритель ТИПр (тяжелоионный прототип) в НИЦ «Курчатовский институт» ИТЭФ используется для моделирования радиационных эффектов в перспективных реакторных конструкционных сталях и сплавах путем облучения ускоренными тяжелыми ионами (Fe, Ti, V и др.) до уровня повреждения до 200 сна, что соответствует эксплуатационному сроку ядерных установок [2]. ТИПр представляет собой линейный ускоритель с RFQ, работающий с длительностью импульса ионного пучка 475 мкс и частотой повторения один импульс в две секунды. Пучок ионов ускоряется до полной энергии 101 кэВ на нуклон (5,6 МэВ для ионов Fe<sup>2+</sup>). Во время облучения образцы поддерживаются при определенной фиксированной температуре (в диапазоне от комнатной температуры до 600 °C).

Помимо микроструктурных изменений в кристаллической решетке, в нейтронно-облученных материалах наблюдаются эффекты трансмутации элементов конструкционных материалов, приводящие к появлению водорода и гелия в материале [3]. Имплантация гелия и водорода может быть использована для моделирования эффектов трансмутации в области повреждения тяжелыми ионами. Эффекты от накопления гелия и создаваемых радиационных повреждений зависят друг от друга и происходят в течение времени порядка наносекунд, поэтому для корректного моделирования облучение тяжелыми ионами и гелием должны проходить одновременно. В мире существует порядка двух десятков установок для одновременного облучения двумя или тремя ионными пучками, при этом в России таких установок нет.

Работа посвящена проектированию двухпучковой установки на базе ускорителя ТИПр для проведения имитационных облучений.

# Энергия пучка гелия

Расчет глубин имплантации ионов и уровня повреждений был выполнен с помощью кода SRIM [4] в соответствии с методикой, описанной в [5; 6]. Глубина создаваемых повреждений от пучка ионов железа 5,6 МэВ в образцах нержавеющей стали составляет около 2 мкм с пиком на глубине 1,5 мкм. Исследуемая микроструктура с повреждениями находится в диапазоне от 300 до 650 нм. Профиль по глубине имплантированного гелия должен повторять профиль повреждений в этой области. Необходимый профиль гелия на этой глубине можно получить, складывая распределения имплантируемых ионов гелия с энергиями от 100 до 300 кэВ с шагом 50 кэВ. На рис. 1 представлено распределение повреждений в нержавеющей стали и распределение имплантированного гелия 1,55 ·  $10^{14}$  см<sup>-2</sup> для моделирования ожидаемых эффектов в термоядерном реакторе DEMO. Подробно о выборе пределов глубины имплантации описано в [7].



*Puc. 1.* Распределение повреждений по глубине от пучка Fe<sup>2+</sup> 5,6 МэВ (синяя кривая), распределение имплантированного гелия по глубине (красная кривая)
 *Fig. 1.* Distribution of damage by depth from a 5.6 MeV Fe<sup>2+</sup> beam (blue curve), distribution of implanted helium by depth (red curve)

ISSN 2541-9447 Сибирский физический журнал. 2024. Том 19, № 2 Siberian Journal of Physics, 2024, vol. 19, no. 2

#### Схема двухпучковой установки

Пучок гелия с энергией от 100 до 300 кэВ легко получить и точно настраивать в постоянном электрическом поле. Для этого ионный источник будет установлен на высоковольтной платформе под потенциалом до 300 кВ. Для облучения была выбрана схема с поворотов образца на 15° от нормали, при которой пучки сходятся под углом 30° между собой. На рис. 2 представлена схема ускорителя ТИПр и проектируемый второй канал.



Рис. 2. Схема двухпучковой установки на базе ускорителя ТИПр:
 1 – источник ионов металлов ВДИИМ; 2 – ускоритель с ПОКФ ТИПр; 3 – мишенная камера; 4 – высоковольтная платформа; 5 – источник газовых ионов ЭЦР; 6 – сепарирующий манит; 7 – ускорительная трубка Fig. 2. Scheme of a two-beam facility based on the HIPR accelerator:
 1 – Source of metal ions MEVVA; 2 – RFQ accelerator HIPr; 3 – Target chamber; 4 – High-voltage platform; 5 – Source of gas ions ECR; 6 – Separating magnet; 7 – Accelerating tube

# Высоковольтная платформа

На высоковольтной платформе (ВВ) размещается: ионный источник, система транспортировки, вакуумная система, система питания и управления. Для выравнивания потенциалов в зоне установки оборудования платформа имеет внешний каркас из труб-обтекателей. Платформа находится на расстоянии 1,5 м от пола и ограждений с земляным потенциалом. Под платформой устанавливается ВВ источник до 300 кВ. Питание на платформу подается через разделительный трансформатор с мощностью 10 кВт. Охлаждение элементов планируется сделать полностью воздушным.

Пучок ионов гелия вытягивается из ионного источника типа ЭЦР с энергией 25 кэВ, далее фокусируется импульсным соленоидом перед сепарирующим магнитом. После сепарации пучок транспортируется к ускорительной трубке с помощью триплета квадрупольных магнитных линз. В ускорительной трубке пучок ускоряется до определенной энергии от 100 до 300 кэВ. До мишенной камеры ускоренный пучок гелия транспортируется с помощью двух пар квадрупольных магнитных линз.

## Мишенная камера

На рис. 3 представлен общий вид мишенной камеры [8]. В мишенной камере два канала сводятся на мишень под углом 30 градусов между собой. Мишень представляет собой кассету, в которую монтируется образец. Кассета монтируется на нагреваемый элемент до 600 °C. Контроль за нагревом ведется за счет термопар, встроенных в нагревательный элемент, и тепловизором непрерывно во время облучения. Для удобства монтажа кассеты слева и справа от пучков предусмотрены вакуумные двери. Измерения токов пучков на образце с каждого канала производится раздельно двумя цилиндрами Фарадея. Перед цилиндрами Фарадея установлены проволочные профилометры. Расположение проволочек в профилометре такое, что-

бы не затенять от пучка облучаемую область. Дополнительная юстировка пучков на мишени производится за счет установки сцинтиллятора на посадочное место кассеты с образами. Наблюдение за сцинтиллятором производится с помощью ПЗС-камеры.



*Рис.* 3. Вид мишенной камеры для одновременного облучения двумя пучками ионов: *1* – канал Fe<sup>2+</sup>4; 2 – канал He<sup>+</sup>; 3 – ЦФ для пучка Fe<sup>2+</sup>; 4 – ЦФ для пучка He<sup>+</sup>; 5 – диагностические окна; 6 – фланец турбомолекулярного насоса *Fig.* 3. View of the target chamber for simultaneous irradiation with two ion beams: *1* – Fe<sup>2+</sup> beamline; 2 – He<sup>+</sup> beamline; 3 – CF for the Fe<sup>2+</sup> beamline; 4 – CF for the He<sup>+</sup> beamline; <sup>5</sup> – Flanges for diagnostic; 6 – Flange for a turbomolecular pump

#### Заключение

В работе представлены результаты проектирования двухпучковой установки на базе ускорителя тяжелых ионов ТИПр для проведения имитационных экспериментов. Были определены необходимые энергии для пучка гелия. Выбрана общая установки с высоковольтной платформой до 300 кВ. Была спроектирована и изготовлена мишенная камера для одновременного облучения двумя пучками.

# Список литературы

- 1. Was G. S., Averback R. S. Radiation Damage Using Ion Beams // Comprehensive Nuclear Materials. 2012. Vol. 1–5. P. 195–221.
- 2. Fedin P. A. et al. Simulation Experiments at the Heavy Ion Accelerator HIPr // Physics of Atomic Nuclei. 2022. № 85, Suppl. 2. P. S50–S54.
- Knaster J., Moeslang A., Muroga T. Materials research for fusion // Nature Phys. 2016. № 12. P. 424–434.
- Ziegler J., Ziegler M., Biersak J. SRIM The stopping and range of ions in matter // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res., Sect. B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2010. № 268. P. 1818–1823.
- Stoller R., Toloczko M., Was G., Certain A., Dwaraknath S., Garner F. On the use of SRIM for computing radiation damage exposure // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res., Sect. B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2013. № 310. P. 75–80.
- Zinkle S., Snead L. Opportunities and limitations for ion beams in radiation effects studies: Bridging critical gaps between charged particle and neutron irradiations // Scripta Materialia. 2018. № 143. P. 154–160.

- 7. Fedin P. A. et al. Requirements for the dual Fe + H/He beam at the accelerator HIPr for simulation of neutron influence on nuclear reactor materials // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. № 1686. P. 01207.
- 8. **Pryanishnikov K. E. et al.** Target chamber for simulation experiments // Physics of Atomic Nuclei. 2022. № 85. P. 1894–1898.

# References

- 1. Was G. S., Averback R. S. Radiation Damage Using Ion Beams. *Comprehensive Nuclear Materials*, 2012, vol. 1–5, pp. 195–221.
- 2. Fedin P. A. et al. Simulation Experiments at the Heavy Ion Accelerator HIPr. *Physics of Atomic Nuclei*, 2022, vol. 85, suppl. 2, pp. S50–S54.
- 3. Knaster J., Moeslang A., Muroga T. Materials research for fusion. *Nature Phys.*, 2016, vol. 12, pp. 424–434.
- Ziegler J., Ziegler M., Biersak J. SRIM The stopping and range of ions in matter. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res., Sect. B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2010, vol. 268, pp. 1818–1823.
- Stoller R., Toloczko M., Was G., Certain A., Dwaraknath S., Garner F. On the use of SRIM for computing radiation damage exposure. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res., Sect. B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2013, vol. 310, pp. 7580.
- Zinkle S., Snead L. Opportunities and limitations for ion beams in radiation effects studies: Bridging critical gaps between charged particle and neutron irradiations. *Scripta Materialia*, 2018, vol. 143, pp. 154–160.
- 7. Fedin P. A. et al. Requirements for the dual Fe + H/He beam at the accelerator HIPr for simulation of neutron influence on nuclear reactor materials. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2020, vol. 1686, 01207.
- 8. **Pryanishnikov K. E. et al.** Target chamber for simulation experiments. *Physics of Atomic Nuclei*, 2022, vol. 85, pp. 1894–1898.

#### Сведения об авторах

Федин Петр Алексеевич, младший научный сотрудник Прянишников Кирилл Евгеньевич, младший научный сотрудник Зиятдинова Альбина Валерьевна, младший научный сотрудник Козлов Александр Владимирович, главный инженер линейных ускорителей Семячкин Вячеслав Кириллович, ведущий конструктор Куйбида Ростислав Петрович, ведущий инженер-физик Кулевой Тимур Вячеславович, доктор технических наук

# Information about the Authors

Petr A. Fedin, Junior Researcher Kirill E. Prianishnikov, Junior Researcher Albina V. Ziiatdinova, Junior Researcher Alexander V. Kozlov, Chief Linear Accelerator Engineer Vyacheslav K. Semyachkin, Lead Designer Rostislav P. Kuibeda, Leading Engineer-Physicist Timur V. Kulevoy, Doctor Of Technical Sciences

Статья поступила в редакцию 13.09.2023; одобрена после рецензирования 15.09.2023; принята к публикации 13.02.2024

The article was submitted 13.09.2023; approved after reviewing 13.09.2023; accepted for publication 13.02.2024

ISSN 2541-9447 Сибирский физический журнал. 2024. Том 19, № 2 Siberian Journal of Physics, 2024, vol. 19, no. 2

62

Научная статья

УДК 621.384 DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-63-70

# Моделирование и измерение эмиттанса пучков ионов углерода в канале радиобиологических исследований на ускорительном комплексе У-70\*

# Александр Васильевич Максимов<sup>1</sup>, Фёдор Николаевич Новоскольцев<sup>2</sup> Роман Юрьевич Синюков<sup>3</sup>, Андрей Антонович Янович<sup>4</sup>

Институт физики высоких энергий им. А. А. Логунова НИЦ «Курчатовский институт» Протвино, Россия

> <sup>1</sup>Alexander.Maximov@ihep.ru <sup>2</sup>Fedor.Novoskoltsev@ihep.ru <sup>3</sup>Roman.Sinyukov@ihep.ru <sup>4</sup>yanovich@ihep.ru

Аннотация

Описана методика определения эмиттанса пучков ионов углерода путем измерения их поперечных размеров в конце воздушного промежутка канала. Рассмотрено обратное преобразование фазовых эллипсов с учетом многократного кулоновского рассеяния частиц и наличия дисперсии в пучке ионов углерода. Приведены значения бетатронного эмиттанса перед первой квадрупольной линзой, которые сравниваются с данными, полученными прямым расчетом, начиная от внутренней мишени. Обсуждаются неточности в расчетных и измеренных значениях эмиттанса. Моделирование и измерение проводились при энергиях пучков перед мишенью 200, 300 и 400 МэВ/нуклон.

#### Ключевые слова

каналы заряженных частиц, ионы углерода, измерение эмиттанса пучка, радиобиологические исследования

#### Для цитирования

Максимов А. В., Новоскольцев Ф. Н., Синюков Р. Ю., Янович А. А. Моделирование и измерение эмиттанса пучков ионов углерода в канале радиобиологических исследований на ускорительном комплексе У–70 // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 2. С. 63–70. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-63-70

<sup>\*</sup>Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

© Максимов А. В., Новоскольцев Ф. Н., Синюков Р. Ю., Янович А. А., 2024

# Simulation and Measurement of Carbon Ion Beam Emittance in the Channel of Radiobiological Research at the Accelerator Complex U-70

# Alexandre V. Maksimov<sup>1</sup>, Fyodor N. Novoskoltsev<sup>2</sup> Roman Yu. Sinyukov<sup>3</sup>, Andrey A. Yanovich<sup>4</sup>

NRC "Kurchatov Institute" IHEP Protvino, Russian Federation

<sup>1</sup>Alexander.Maximov@ihep.ru <sup>2</sup>Fedor.Novoskoltsev@ihep.ru <sup>3</sup>Roman.Sinyukov@ihep.ru <sup>4</sup>yanovich@ihep.ru

#### Abstract

The technique for determining the emittance of carbon ion beams by measuring their transverse dimensions at the end of the air gap of the channel is described. The inverse transformation of phase ellipses is considered, taking into account multiple Coulomb scattering of particles and the presence of dispersion in the carbon ion beam. The values of betatron emittance before the first quadrupole lens are given and compared with data obtained by direct calculation starting from the inner target. Inaccuracies in the calculated and measured emittance values are discussed. Simulations and measurements were performed at beam energies of 200, 300, and 400 MeV/nucleon in front of the target.

#### Keywords

charged particles beamlines, carbon ions, beam emittance measurement, radiobiological studies

#### For citation

Maksimov A. V., Novoskoltsev F. N., Sinyukov R. Yu., Yanovich A. A. Simulation and measurement of carbon ion beam emittance in the channel of radiobiological research at the accelerator complex U-70. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 2, pp. 63–70 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-63-70

# Структура канала

Канал транспортировки пучков ионов углерода от ускорителя У-70 в зону радиобиологических исследований [1] функционально включает в себя следующие группы магнитооптических элементов (рис. 1):

- септум-магнит и три дипольных магнита, отклоняющие пучок на угол ~ 32°;
- квартет и триплет квадрупольных линз, формирующие в зоне радиобиологических исследований пучок с требуемыми линейными и угловыми размерами;
- вобблер-магниты, установленные сразу после последней линзы и формирующие поперечное равномерное дозовое поле в зоне радиобиологических исследований.

Внутренняя мишень расположена в 28 прямолинейном промежутке ускорителя, септум-магнит установлен в 34 промежутке. Отклоняющие магниты и квартет квадрупольных линз расположены в кольцевом зале ускорителя, в то время как триплет линз и вобблер-магниты размещены за биологической защитой ускорителя. Зона радиобиологических исследований отделена от канала бетонной стенкой толщиной 1 м.

Для установки детектора обратной связи по интенсивности между второй и третьей квадрупольной линзой имеется технологический разрыв вакуумного ионопровода, эквивалентный по материалу ~700 мкм Mylar ( $C_5H_4C_2$ ). Вакуум заканчивается на последней квадрупольной линзе (перегородка из Mylar имеет толщину 200 мкм), после которой пучок ионов углерода транспортируется исключительно по воздуху.

Для определения и оптимизации режимов магнитооптических элементов канала необходимо знать пространственные характеристики пучка перед первой квадрупольной линзой, т. е. двумерные распределения частиц в фазовых плоскостях  $\{xx'\}$  и  $\{yy'\}$ . Эти распределения мож-



 Puc. 1. Взаимное расположение ускорителя У-70 и канала радиобиологических исследований в экспериментальном зале 1БВ

 Fig. 1. The relative position of the U-70 accelerator and the radiobiological research channel in the experimental hall 1BV

но получить как прямым расчетом, начиная от внутренней мишени, так и после измерения эмиттанса пучка в последнем воздушном свободном промежутке и преобразовании фазовых параметров пучка в начало канала.

# Преобразование параметров фазового эллипса

При нахождении эмиттанса будем исходить из предположения, что пучок частиц в фазовых плоскостях имеет эллиптическую форму. Во многих случаях это допущение вполне оправдано, в противном случае определяется эффективный эмиттанс.

Уравнение фазового эллипса Флоке  $\gamma x^2 + 2\alpha x x' + \beta x'^2 = \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – эмиттанс пучка, имеет коэффициенты квадратичной формы, которые напрямую не дают значения линейной и угловой огибающих пучка.

Значение огибающих пучка непосредственно можно получить при рассмотрении σ-матрицы, коэффициенты которой связаны с параметрами эллипса Флоке как

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{21} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} \end{bmatrix} = \boldsymbol{\varepsilon} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\beta} & -\boldsymbol{\alpha} \\ -\boldsymbol{\alpha} & \boldsymbol{\gamma} \end{bmatrix}$$

и являются параметрами фазового эллипса, уравнение которого выглядит как

$$\sigma_{22}x^{2} - 2\sigma_{21}xx' + \sigma_{11}x'^{2} = \varepsilon^{2}$$

 $(\sigma_{11} = x_{\max}^2, \sigma_{22} = x_{\max}^{'2}, \sigma_{11}\sigma_{22} - \sigma_{21}^2 = \varepsilon^2,$  коэффициент корреляции  $r = \sigma_{21} / \sqrt{\sigma_{11}\sigma_{22}}).$ 

Преобразование  $\sigma$ -матрицы дается выражением  $\sigma = H\sigma_0 H^T (H = \{h_{ij}\})$  – матрица преобразования параметров траекторий произвольного участка канала). Отсюда следует, что если коэффициенты  $\sigma$ -матрицы записать как компоненты вектор-столбца  $\xi$  ( $\xi^T = [\sigma_{11}, \sigma_{21}, \sigma_{22}]$ ), то их преобразование можно представить в виде  $\xi = M\xi_0$ , где

$$M = \begin{pmatrix} h_{11}^2 & 2h_{11}h_{12} & h_{12}^2 \\ h_{11}h_{21} & h_{11}h_{22} + h_{12}h_{21} & h_{12}h_{22} \\ h_{21}^2 & 2h_{21}h_{22} & h_{22}^2 \end{pmatrix}.$$
 (1)

Преобразование параметров  $\sigma_{11}, \sigma_{21}, \sigma_{22}$  в свободном промежутке при учете дисперсии и многократного кулоновского рассеяния частиц на воздухе имеет вид  $\xi = M\xi_0 + \Delta\xi$ :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{21} \\ \sigma_{22} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2z & z^2 \\ 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11}^0 \\ \sigma_{21}^0 \\ \sigma_{22}^0 \end{bmatrix} + \delta_p^2 \begin{bmatrix} D^2 \\ DD' \\ D'^2 \end{bmatrix} + \theta^2 \begin{bmatrix} z^2 / 3 \\ z / 2 \\ 1 \end{bmatrix},$$
(2)

где z – длина свободного промежутка, D(z) и D'(z) – линейная и угловая дисперсии в пучке,  $\delta_p = (p - p_0)/p_0$  – относительный разброс частиц по импульсам,  $\theta$  – полный угол многократного кулоновского рассеяния частиц в свободном промежутке.

#### Измерение поперечных размеров пучков

Измерения поперечных размеров пучков ионов углерода проводились весной 2023 года. Для измерений использовался свободный воздушный промежуток, начиная от последней квадрупольной линзы. При этом относительные продольные координаты точек измерения составляли z = 0, 2, 4 и 6 м (точка z = 0 соответствует началу промежутка). Для каждой энергии пучка измерения проводились одновременно во всех четырех точках.

Положение и размер пучка в поперечной плоскости определялись с помощью полимерной радиохромной дозиметрической пленки GafChromic EBT3 [2]\*. Структура пленки имеет активный слой толщиной 30 мкм, расположенный между защитными слоями прозрачного полиэстера (полистирола) толщиной 125 мкм каждый. Пленка EBT3 имеет высокое пространственное разрешение < 25 мкм. Максимум поглощения пленки приходится на длину волны 636 нм и находится в видимой зоне красного цвета. Поэтому извлечение красного канала из RGB-изображений (Red, Green, Blue) позволяет улучшить чувствительность сканера при сканировании пленки EBT3.

Все пленки сканировались на планшетном RGB сканере EPSON EXPRESSION 10000 XL в пропускающем режиме с пространственным разрешением 150 точек на дюйм и глубиной цвета 48 бит (по 16 бит на канал) без цветокоррекции. Полученные изображения сохранялись в формате TIFF без сжатия и затем обрабатывались по красному каналу. Значение оптической плотности для каждого пикселя изображения определялось как десятичный логарифм отношения интенсивности цвета до и после облучения пленки. До облучения интенсивность каждого из трех цветов пленки считалась равным 65535 (16-битное значение полной интенсивности). Интегральная интенсивность пучков ионов углерода во время облучения пленок EBT3 составляла примерно 2 · 10<sup>9</sup> частиц (или 8–10 сбросов пучка).

<sup>\*</sup> Пленка дозиметрическая GAFCHROMIC EBT3. URL: http://www.gafchromic.ru/docs/EBT3-3.pdf.

#### Определение эмиттанса пучка

Согласно выражениям (1–2) полный размер пучка в свободном промежутке зависит от начальных параметров фазового эллипса  $\sigma_{11}^0, \sigma_{21}^0$  и  $\sigma_{22}^0$  следующим образом:

$$\begin{aligned} x^2 &= x_0^2 + \Delta x_0^2 ,\\ x_0^2 &= \sigma_{11}^0 + 2\sigma_{21}^0 z + \sigma_{22}^0 z^2 ,\\ \Delta x_0^2 &= D^2(z) \delta_p^2 + \theta^2 z^2 / 3 + \sum \left(\theta_k \Delta z_k\right)^2 ,\end{aligned}$$

где *x* – измеренный размер пучка в точке с относительной координатой *z*,  $x_0$  – размер невозмущенного монопучка,  $\Delta x_0^2$  – добавка к квадрату размера монопучка с учетом дисперсии и рассеяния частиц на воздухе и в предыдущих пленках ( $\Delta z_k$  – расстояния до предыдущих пленок,  $\theta_k$  – углы многократного кулоновского рассеяния в пленках).

Для трех произвольных точек ( $i = 0, 1, 2; z_0 = 0$ ) можно решить систему уравнений

$$\sigma_{11}^{0} + 2\sigma_{21}^{0}z_{i} + \sigma_{22}^{0}z_{i}^{2} = x^{2}(z_{i}) - \Delta x_{0}^{2}(z_{i})$$

и найти коэффициенты σ-матрицы и эмиттанс пучка  $\varepsilon_0^2 = \sigma_{11}^0 \sigma_{22}^0 - (\sigma_{21}^0)^2$  в точке  $z_0$ . Так как квадрат размера невозмущенного монопучка описывается полиномом второй степени относительно z, то набор  $\{x_0^2(z_i)\}$  для четырех точек фитировался квадратичной функцией  $f(z_i, z_i^2)$ , которая и использовалась для определения  $\sigma_{11}^0, \sigma_{21}^0$  и  $\sigma_{22}^0$ .

После определения параметров фазового эллипса и эмиттанса пучка после последней квадрупольной линзы можно сделать обратное преобразование фазовых эллипсов в начало канала с учетом рассеяния частиц в вакуумных перегородках. В силу того, что полное преобразование параметров фазового эллипса можно представить в виде  $\xi = M\xi_0 + \Delta\xi$ , то обратное преобразование может быть записано как

$$\xi_0 = \mathbf{M}^{-1}(\boldsymbol{\xi} - \Delta \boldsymbol{\xi}).$$

# Моделирование вывода пучка

Для вывода из ускорителя У-70 пучков ионов углерода применяется классическая двухступенчатая схема вывода Пиччиони – Райта [3] с использованием внутренней мишени ВМ и выводного септум-магнита СМ, расположенных в 28 и 34 прямолинейных промежутках (рис. 2). При выводе пучков с энергиями 200, 300 и 400 МэВ/нуклон используются мишени из бериллия толщиной соответственно 1,37, 2,52 и 3,83 мм.

Мишень смещена в радиальном направлении от центра У-70, расстояние между ее кромкой и равновесной орбитой составляет 50 мм. Наведение пучка на внутреннюю мишень и септум-магнит осуществляется посредством шумовой (стохастической) раскачки амплитуд горизонтальных бетатронных колебаний циркулирующего пучка [4]. Для всех режимов вывода импульс частиц после прохождения через мишень уменьшается на ~0,7 %. Вышедшие из мишени частицы совершают бетатронные колебания относительно новой, смещенной внутрь кольца равновесной орбиты, и через половину длины волны забрасываются за токовую перегородку выводного септум-магнита.

Начальный эмиттанс пучка в значительной степени зависит от размеров источника. Если в вертикальной плоскости линейный размер источника определяется высотой мишени (ее полный вертикальный размер равен 10 мм), то в горизонтальной плоскости – величиной заброса



*Puc. 2.* Принципиальная схема вывода пучка ионов углерода из ускорителя У-70 *Fig. 2.* Principal scheme of carbon ion beam extraction from the U-70 accelerator

частиц за кромку мишени. При этом угловой размер определяется в основном многократным кулоновским рассеянием частиц в мишени.

При моделировании вывода пучка из ускорителя предполагалось, что распределение частиц на мишени в горизонтальной плоскости  $f(x) = f_1(x) + f_2(x)$ . При этом  $f_1(x) \sim 10A[1 - (x / \Delta x_1)^2]^{3/2}[4] (0 \le x \le x_1 = 1 \text{ мм})$ .

В расчетах также предполагалось, что на мишени относительный разброс частиц по импульсам  $\delta p = (p-p_0)/p_0$  описывается нормальным распределением с  $\sigma[\delta_p] = 0,1$  % и ограничением по основанию на уровне  $\pm 2\sigma[\delta_p]$ .

#### Результаты

В таблице приведены расчетные и измеренные (восстановленные) значения бетатронного эмиттанса пучков ионов углерода (т. е. при  $\delta_p = 0$ ) перед первой квадрупольной линзой для 95%-й интенсивности пучков. Значения линейной *D* и угловой *D'* дисперсий в пучке перед первой линзой равны примерно 8 м и 0,8 м соответственно.

Расчетные и измеренные значения эмиттанса пучков (мм мрад)

Параметр	Горизонтальная			Вертикальная		
	плоскость			плоскость		
Энергия, МэВ/нуклон	200	300	400	200	300	400
Моделирование	12	10	9	23	19	17
Измерение	28	34	36	36	27	31

Calculated and measured values of the beams emittance (mm·mrad)

Сравнение расчетных и измеренных значений эмиттанса пучков показывает, что расчетные значения эмиттанса меньше измеренных для всех начальных энергий, причем для горизонтальной плоскости наблюдаются значительные расхождения.

Необходимо отметить, что существуют определенные трудности с описанием пространственного распределения частиц в горизонтальной плоскости в процессе наведения пучка на внутреннюю мишень посредством шумовой раскачки амплитуд горизонтальных бетатронных колебаний пучка. Кроме того, при моделировании вывода пучка из ускорителя не учитывались следующие процессы, приводящие к увеличению эффективных размеров пучка и, следовательно, значений его эмиттанса:

- рассеянное поле септум-магнита вне токовой перегородки, искажающее траектории частиц циркулирующего пучка как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях, и влияющее на распределение частиц на внутренней мишени;
- многократное кулоновское рассеяние ионов углерода в стенках вакуумной камеры кольцевых электромагнитных блоков на участке вывода пучка из ускорителя (в расчетах частицы просто выбывали из рассмотрения);
- так называемая «пробежка пучка», возникающая из-за спада магнитного поля в септум- и трех отклоняющих магнитах в процессе вывода частиц из ускорителя, особенно при более высоких энергиях пучков.

Что касается измеренных значений эмиттанса, то при измерении поперечных размеров граница пучка частиц не очень хорошо определена из-за многократного кулоновского рассеяния ионов углерода в стенках ионопровода, вакуумных перегородках канала и в воздухе. Также на величину эмиттанса влияют неопределенности при взаимном переводе расчетных градиентов магнитного поля в реальные значения токов в квадрупольных линзах, а также неточности в определении эффективной длины линз.

Фактически, приведенные в таблице расчетные значения – это оценка эмиттанса пучков снизу, а измеренные значения – оценка сверху.

# Список литературы

- Maximov A. V., Antipov Y. M., Britvich G. I. at el. The carbon ion beam extraction scheme from the U-70 synchrotron for radiobiological researches // Proceedings of 26th RuPAC2018. Protvino, 2018. P. 139–141. https://DOI:10.18429/JACoW-RUPAC2018-FRCAMH01.
- 2. Sorriaux J., Kacperek A., Rossomme S. at al. Evaluation of Gafchromic EBT3 films characteristics in therapy photon, electron and proton beams // European Journal of Medical Physics. 2013. Vol. 29, № 6. P. 599–606.
- 3. Piccioni O. at el. External proton Beam of the Cosmotron // Rev. Sci. 1995. Vol. 26. P. 232.
- 4. **Иванов С. В., Лебедев О. П.** Поперечная шумовая раскачка пучка в синхротроне У-70 // ПТЭ. 2013. № 3. С. 5–11. DOI 10.7868/S0032816213020201

#### References

- 1. **Maximov A. V., Antipov Y. M., Britvich G. I. at el.** The carbon ion beam extraction scheme from the U-70 synchrotron for radiobiological researches. *Proceedings of 26th RuPAC2018*, Protvino, 2018. pp. 139–141. https://doi:10.18429/JACoW-RUPAC2018-FRCAMH01.
- 2. Sorriaux J., Kacperek A., Rossomme S. at al. Evaluation of Gafchromic EBT3 films characteristics in therapy photon, electron and proton beams. *European Journal of Medical Physics*, 2013, vol. 29, no. 6, pp. 599–606.
- 3. Piccioni O. at el. External proton Beam of the Cosmotron. Rev. Sci., 1995, vol. 26, p. 232.
- 4. **Ivanov S. V., Lebedev O. P.** Transverse noise blow-up of the beam in the U-70 synchrotron. *Instrum Exp Tech*, 2013, vol. 56, pp. 249–255. https://doi.org/10.1134/S0020441213020140

#### Сведения об авторах

- Максимов Александр Васильевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
- Новоскольцев Федор Николаевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник
- Синюков Роман Юрьевич, научный сотрудник
- Янович Андрей Антонович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

# Information about the Author

Alexandre V. Maximov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher

Fyodor N. Novoskoltsev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher

Roman Yu. Sinyukov, Research Associate

Andrey A. Yanovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher

Статья поступила в редакцию 13.09.2023; одобрена после рецензирования 20.09.2023; принята к публикации 14.02.2024 The article was submitted 13.09.2023; approved after reviewing 20.09.2023; accepted for publication 14.02.2024 Научная статья

УДК 621.384.6.01(075.8) DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-71-79

# Работа ВЧ-систем в ходе совместных сеансов бустера и нуклотрона\*

Олег Игоревич Бровко<sup>1</sup>, Антон Акмалович Володин<sup>2</sup> Валерий Анатольевич Лебедев<sup>3</sup>, Евгений Михайлович Сыресин<sup>4</sup> Анатолий Олегович Сидорин<sup>5</sup>, Георгий Александрович Фатькин<sup>6</sup>

<sup>1-5</sup>Объединенный институт ядерных исследований

Дубна, Россия

<sup>6</sup>Козилаб Сибирь Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>volodin@jinr.ru

Аннотация

В статье обсуждаются результаты пусконаладочных работ ВЧ-систем инжекционного комплекса NICA и планы по их дальнейшему развитию. Подготовка инжекционного комплекса к инжекции в коллайдер требует увеличения интенсивности пучка на выходе нуклотрона примерно на два порядка. Получение требуемой интенсивности будет достигнуто накоплением пучка на энергии инжекции с использованием электронного охлаждения и уменьшением потерь при ускорении. Это потребует оптимизации всех систем комплекса, и в том числе значительного уменьшения потерь, связанных с ВЧ-системами. Полученный опыт позволяет выбрать оптимальную стратегию для дальнейшего развития ВЧ-систем. Основными направлениями являются: (1) накопление пучка в продольном фазовом пространстве при инжекции в бустер, (2) уменьшение роста продольного эмиттанса при ускорении, (3) перепуск пучка сгусток-в-сгусток из бустера в нуклотрон без роста продольного эмиттанса и (4) минимизация потерь при ускорении и перепусках пучка. Последнее требует согласования темпа ускорения с возможностями существующих ВЧ-систем.

#### Ключевые слова

синхротрон, ускоритель, ВЧ-система, бустер, нуклотрон, коллайдер, комплекс NICA, адиабатический захват

#### Для цитирования

Бровко О. И., Володин А. А., Лебедев В. А. Сыресин Е. М., Сидорин А. О., Фатькин Г. А. Работа ВЧ-систем в ходе совместных сеансов бустера и нуклотрона // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 2. С. 71–79. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-71-79

\*Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

© Бровко О. И., Володин А. А., Лебедев В. А. Сыресин Е. М., Сидорин А. О., Фатькин Г. А., 2024

# **Operation of Rf Systems During Joint Booster and Nuclotron Sessions**

# Oleg I. Brovko<sup>1</sup>, Anton A. Volodin<sup>2</sup>, Valery A. Lebedev<sup>3</sup> Evgeny M. Syresin<sup>4</sup>, Anatoly O. Sidorin<sup>5</sup>, Georgy A. Fatkin<sup>6</sup>

<sup>1-5</sup> JINR, Dubna, Russian Federation

<sup>6</sup>Cosylab Siberia, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup>volodin@jinr.ru

#### Abstract

The article discusses the results of commissioning of RF systems of the NICA injection complex and plans for their further development. The preparation of the injection complex for injection into the collider requires an increase in the beam intensity in the Nuclotron outlet by about two orders of magnitude. Obtaining the required intensity will be achieved by accumulating the beam on injection energy using electronic cooling and reducing acceleration losses. This will require optimization of all systems of the complex, including a significant reduction in losses associated with RF systems. The experience allows us to choose the optimal strategy for the further development of HF systems. The main directions are: (1) accumulation of the beam in the longitudinal phase space during injection into the Booster, (2) reduction of the growth of the longitudinal emittance during acceleration, (3) bypass of the beam clot-in-clot from the Booster to the Nuclotron without growth of the longitudinal emittance, and (4) minimizing losses during acceleration and beam bypasses. The latter requires matching the acceleration rate with the capabilities of existing HF systems.

### Keywords

synchrotron, accelerator, RF system, Booster, Nuclotron, collider, complex NICA, adiabatic capture

#### For citation

Brovko O., Volodin A., Lebedev V., Syresin E., Sidorin A., Fatkin G. Operation of Rf Systems During Joint Booster and Nuclotron Sessions. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 2, pp. 71–79 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-71-79

#### Введение

Комплекс NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility) создается в Объединенном институте ядерных исследований и предназначен для изучения свойств плотной барионной материи [1]. Было проведено четыре пусконаладочных сеанса, в ходе которых ускоряющие станции отработали в штатном режиме (рис. 1, a,  $\delta$ ) [2]. Подготовка инжекционного комплекса к коллайдерным экспериментам требует увеличения интенсивности на выходе нуклотрона примерно на 2 порядка. Получение требуемой интенсивности будет достигнуто накоплением пучка на энергии инжекции с использованием электронного охлаждения и уменьшением потерь при ускорении. Это потребует существенного изменения режимов работы линейного ускорителя и бустера и оптимизации работы всех систем комплекса, и в том числе работы ВЧ-систем бустера и нуклотрона.

В статье обсуждаются результаты пусконаладочных работ ВЧ-систем инжекционного комплекса NICA и планы по их дальнейшему развитию. Основными направлениями являются: 1) накопление пучка в продольном фазовом пространстве при инжекции в бустер; 2) предотвращение роста продольного эмиттанса при ускорении; 3) перепуск пучка сгусток-в-сгусток из бустера в нуклотрон без роста продольного эмиттанса; 4) минимизация потерь при ускорении и перепусках пучка. Последнее требует согласования темпа ускорения с возможностями существующих ВЧ-систем.

# Накопление пучка в продольном фазовом пространстве при инжекции в бустер

Штатный режим ВЧ-станций характеризуется полосой частот 0,58 ÷ 5,85 МГц со сменой кратности из-за недостаточной полосы перестройки частоты ВЧ-системы [3]. В процессе 4-го пусконаладочного сеанса была проверена возможность работы ускоряющих станций на час-




*Fig. 1.* Dependence of accelerating voltage and magnetic field on time in milliseconds, synchronization pulses (booster) (*a*). Dependence of accelerating voltage, magnetic field and accelerating frequency on time in milliseconds (nuclotron) ( $\delta$ )

тоте ~ 120 кГц, которая много меньше минимальной номинальной частоты и равна частоте обращения частиц на энергии инжекции. Было достигнуто напряжение 2 кВ длительностью 500 мс, при этом усилители работали на 60 % от максимальной мощности. Отказ от режима, при котором происходила смена кратности, открывает возможность избежать перебанчировок и провести ускорения на первой гармонике частоты обращения на протяжении всего цикла. Помимо избежания перебанчировок, появляется допустимость эффективной реализации многоразовой инжекции.

Режим многоразовой инжекции реализуется с помощью системы электронного охлаждения [4] и является оптимальным для накопления пучка в продольном фазовом пространстве. При этом половина орбиты отведена для накопленного ядра, а вторая используется для инжекции новой порции. Поскольку длительность охлаждения ( $\approx 100$  мс) много меньше длительности цикла ускорения ( $\approx 5$  с), это позволяет многократно увеличить производительность инжекционного комплекса. Удлинение цикла ускорения из-за уменьшения ускоряющего напряжения на низких частотах компенсируется отсутствием перегруппировки сгустков. Основными факторами оценки амплитуды напряжения ВЧ при многоразовой инжекции являются:

- собственное поле пучка;
- скорость электронного охлаждения.

# Предотвращение роста продольного эмиттанса при ускорении

Для устранения потерь ионного пучка при ускорении необходимо предотвращать рост продольного эмиттанса. Продолжительная работа как силовой аппаратуры, так и маломощной электроники сопровождается дрейфом их параметров во времени.

В 4-м пусконаладочном сеансе на комплексе NICA был замечен процесс роста продольного эмиттанса из-за неточных коэффициентов связи магнитного поля с опорным сигналом ускоряющей частоты, приводящих к резкому изменению фазы ВЧ-напряжения. Возбуждались синхротронные колебания на столе вывода бустера (рис. 2), оказывающие негативное влияние на интенсивность ионного пучка при захвате в нуклотроне вследствие роста эмиттанса.



*Puc. 2.* Зависимость тока пучка и магнитного поля от времени миллисекундах (бустер) *Fig. 2.* Dependence of beam current and magnetic field on time in milliseconds (booster)

Анализ процессов, приводящих к неэффективному захвату пучка в нуклотроне, содержал задачу измерения синхротронной частоты. Измерение синхротронной частоты производилось с помощью быстрого трансформатора тока. Оцифровка запускалась в конце цикла ускорения в бустере. Длительность сбора данных 210 мс, частота дискретизации 50 МГц (рис. 3). Измерение позволило обнаружить резкое изменение фазы пучка, которое впоследствии подтвердилось на датчике положения пучка (рис. 4).



*Puc. 3.* Синхротронная частота от времени в миллисекундах (бустер) *Fig. 3.* Synchrotron frequency versus time in milliseconds (booster)



*Puc. 4.* Сигнал с датчика положения пучка, время в миллисекундах (бустер) *Fig. 4.* Signal from the beam position sensor, time in milliseconds (booster)

Для повышения эффективности анализа процессов, влияющих на захват пучка, было решено разработать фазовый монитор, позволяющий наблюдать фазу пучка относительно фазы ВЧ и модернизировать датчик положения пучка.

Для предотвращения роста продольного эмиттанса разрабатывается обратная связь по положению пучка, основными функциями которой будут компенсация как медленных процессов, связанных с уходом параметров на длинном промежутке времени, так и быстрых процессов, связанных с мгновенными изменениями.

# Перепуск пучка сгусток-в-сгусток из бустера в нуклотрон без роста продольного эмиттанса

В 4-м пусконаладочном сеансе был реализован режим перепуска пучка сгусток-в-сгусток из бустера в нуклотрон. Алгоритм перепуска состоял в том, чтобы за 10<sup>3</sup> периодов ВЧ-напряжения до вывода пучка в бустере изменить на определенную величину фазу ВЧ в нуклотроне (рис. 5). Задержка, выраженная в периодах ВЧ-напряжения, определялась скоростью перестройки четвертьволнового резонатора ускоряющих станций нуклотрона (рис. 6).



*Puc. 5.* Сдвиг фазы в ВЧ-напряжения нуклотроне *Fig. 5.* Phase shift in the RF voltage of the nuclotron



*Puc. 6.* Зависимость амплитуды ВЧ-напряжения от времени в миллисекундах *Fig. 6.* Dependence of the RF voltage amplitude on time in milliseconds

Ускоряющие станции работали на 4-й кратности, а перепуск осуществлялся в первую сепаратрису относительно импульса выводного кикера. Эффективное напряжение на ускоряющем зазоре имело величину 2,5 кВ.

В последующих сеансах будет применена новая система генерации опорного сигнала для ВЧ-систем ускорительного комплекса NICA, которая позволит более гибко выставлять задержку по фазе для перепуска из сгустка в сгусток.

# Минимизация потерь при ускорении и перепусках пучка

Для минимизации потерь при ускорении и перепусках пучка необходимо точное согласование магнитного поля с ВЧ-напряжением. Реализация адиабатического захвата, проведенная в предыдущих пусконаладочных сеансах, требует оптимизации. Для оценки процессов, происходящих во время предыдущих сеансов, когда адиабатический захват не был настроен либо требовал оптимизации, рассмотрим модель, при которой напряжение в 10 кВ включается на постоянном магнитном поле до начала подъема. Энергия инжекции 3,2 МэВ/н, охлаждение осуществляется на постоянном участке магнитного поля при энергии ионов 64 МэВ/н, A/Z ~ 4,43 (рис. 7). На рис. 8 продемонстрированы потери при реализации схожего режима в нуклотроне.



Puc. 7. Зависимость продольного акцептанса от магнитного поля при постоянной амплитуде ВЧ-напряжения *Fig.* 7. Dependence of the longitudinal acceptance on the magnetic field at a constant amplitude of the RF voltage

ISSN 2541-9447 Сибирский физический журнал. 2024. Том 19, № 2 Siberian Journal of Physics, 2024, vol. 19, no. 2



Puc. 8. Зависимость тока пучка и магнитного поля от времени в миллисекундах *Fig. 8.* Dependence of the beam current and magnetic field on time in milliseconds

Для сравнения рассмотрим режим адиабатического захвата, настроенный в бустере (рис. 9), и соответствующую интенсивность на рис. 10.



*Puc. 9.* Зависимость ускоряющего напряжения и магнитного поля от времени в миллисекундах *Fig. 9.* Dependence of accelerating voltage and magnetic field on time in milliseconds



*Puc. 10.* Зависимость тока пучка и магнитного поля от времени миллисекундах (бустер) *Fig. 10.* Dependence of beam current and magnetic field on time in milliseconds (booster)

Таким образом, для минимизации потерь при ускорении и перепусках пучка необходимо точно согласовывать магнитное поле с амплитудой ускоряющего напряжения.

К будущему пусконаладочному сеансу разрабатывается программа, основной задачей которой будет расчет параметров ВЧ-напряжения в зависимости от производной магнитного поля, что позволит улучшить эффективность захвата пучков ионов.

## Заключение

По итогам прошедших пусконаладочных сеансов ВЧ-системы комплекса NICA надежно отработали в штатном режиме. Но стоит отметить, что для улучшения эффективности захвата пучков ионов режимы работы ускоряющих станций следует оптимизировать, а в отдельных случаях изменить. Это потребует как новых разработок, так и модернизации существующих аппаратных решений.

# Список литературы

- Сисакян А. Н. The nuclotron-based ion collider fAcility at the Joint Institute for Nuclear Research». Part of Particles and nuclei. Proceedings, 18th International Conference, PANIC08, Eilat, Israel, November 914, 2008, 630С-637С. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2009.05.138
- 2. Бровко О. И., Володин А. А., Гребенцов А. Ю., Прозоров О. В., Сыресин Е. М., Сидорин А. О. Исследование режимов работы ВЧ-систем синхротронов бустер-нуклотрон при оптимизации захвата и ускорения пучков ионов углерода. Письма в ЭЧАЯ // ОИЯИ, Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, № 4(249). С. 650–656.
- Гребенцов А. Ю., Бровко О. И., Бутенко А. В., Герклотц В. А., Малышев А. М., Петров В. Д., Прозоров О. В., Сыресин Е. М., Володин А. А., Батраков А. М., Крутихин С. А., Куркин Г. Ю., Петров В. М., Пилан А. М., Ротов Е., Трибендис А. Г., Фатькин Г. А. Booster RF System First Beam Tests // Proc. 27th Russian Particle Accelerator Conf. (RuPAC2021), Alushta, Russia, Sep. 2021. P. 370372. DOI: 10.18429/JACoW-RuPAC2021-WEPSC14.
- Melnikov S. A., Ahmanova E. V., Butenko A. V., Kobets A. G., Meshkov I. N., Orlov O. S., Osipov K. G., Semenov S. V., Sergeev A. S., Sidorin A. A., Sidorin A. O., Syresin E. M., Ivanov A. V. Features of the electron cooling system of the NICA booster // 27th Russian Particle Acc. Conf. RuPAC2021, Alushta, Russia. JACoW Publishing. doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUPSB04.

# References

- Sisakian A. N. Installation of an ion collider based on a Nuclotron at the Joint Institute for Nuclear Research. Part of the particles and nuclei. Proceedings of the 18th International Conference, PANIC 08, July, Israel, November 9-14, 2008, 630 C-637C. DOI: 10.1016/j. nuclphysa.2009.05.138.
- 2. Brovko O. I., Volodin A. A., Grebentsov A. Y., Prozorov O. V., Syresin E. M., Sidorin A. O. Investigation of the modes of operation of RF synchrotron Booster-Nuclotron systems in optimizing the capture and acceleration of carbon ion beams. *Letters to ECHAYA*, 2023, vol. 20, no. 4(249), pp. 650656. (in Russ.)
- Grebentsov A. Y., Brovko O. I., Butenko A. V., Gerklotts V. A., Malyshev A. M., Petrov V. D., Prozorov O. V., Syresin E. M., Volodin A. A., Batrakov A. M., Krutikhin S. A., Kurkin G. Y., Petrov V. M., Pilan A. M., Rotov E., Tribendis A. G., Fatkin G. A. Booster RF System First Beam Tests. Proc. 27th Russian Particle Accelerator Conf. (RuPAC'21), Alushta, Russia, Sep. 2021, pp. 370372, DOI:10.18429/JACoW-RuPAC2021-WEPSC14. E. V.

 Melnikov S. A., Ahmanova, Butenko A. V., Kobets A. G., Meshkov I. N., Orlov O. S., Osipov K. G., Semenov S. V., Sergeev A. S., Sidorin A. A., Sidorin A. O., Syresin E. M., Ivanov A. V. Features of the electron cooling system of the NICA booster. 27th Russian Particle Acc. Conf. RuPAC2021, Alushta, Russia. JACoW Publishing. doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUPSB04.

## Сведения об авторах

- Бровко Олег Игоревич, начальник научно-экспериментального отдела радиоэлектронных систем
- Володин Антон Акмалович, начальник группы эксплуатации и разработки систем управляющей электроники
- **Лебедев Валерий Анатольевич,** доктор физико-математических наук, заместитель начальника отделения по научной работе,
- Сыресин Евгений Михайлович, доктор физико-математических наук, главный инженер ускорительного комплекса NICA
- Сидорин Анатолий Олегович, кандидат физико-математических наук, заместитель начальника отделения по научной работе
- Фатькин Георгий Александрович, кандидат технических наук

# Information about the Authors

Oleg I. Brovko, Head of the Scientific and Experimental Department of Radio electronic Systems

Anton A. Volodin, Head of the Group for Operation and Development of Control Electronics Systems

- Valery A. Lebedev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Head of the Department for Scientific Work
- **Evgeny M. Syresin,** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Engineer of the NICA Accelerator Complex
- Anatoly O. Sidorin, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Head of the Department for Scientific Work
- Georgy A. Fatkin, Candidate of Technical Sciences

Статья поступила в редакцию 19.09.2023; одобрена после рецензирования 02.10.2023; принята к публикации 04.03.2024

The article was submitted 19.09.2023; approved after reviewing 02.10.2023; accepted for publication 04.03.2024

Научная статья

УДК 621.384.658 DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-80-87

# Новейшие модели ускорителей ЭЛВ с энергией до 4 МэВ\*

# Денис Сергеевич Воробьев<sup>1</sup>, Николай Константинович Куксанов<sup>2</sup> Евгений Вадимович Домаров<sup>3</sup>, Юрий Иванович Голубенко<sup>4</sup> Алексей Иванович Корчагин<sup>5</sup>, Рустам Абельевич Салимов<sup>6</sup> Сергей Николаевич Фадеев<sup>7</sup>, Иван Константинович Чакин<sup>8</sup> Алексей Вячеславович Семенов<sup>9</sup>, Александр Владимирович Лаврухин<sup>10</sup> Юлия Эдуардовна Потапова<sup>11</sup>

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН

Новосибирск, Россия

<sup>1</sup>d.s.vorobev@inp.nsk.su <sup>2</sup>n.k.kuksanov@inp.nsk.su <sup>3</sup>e.v.domarov@inp.nsk.su <sup>4</sup>yu.i.golubenko@inp.nsk.su <sup>5</sup>a.i.korchagin@inp.nsk.su <sup>6</sup>r.a.salimov@inp.nsk.su <sup>7</sup>s.n.fadeev@inp.nsk.su <sup>8</sup>i.k.chakin@inp.nsk.su <sup>9</sup>a.v.semenov@inp.nsk.su <sup>10</sup>a.v.lavrukhin@inp.nsk.su <sup>11</sup>yu.e.potapova@inp.nsk.su

Аннотация

В статье рассматриваются новые модели ускорителей серии ЭЛВ: ЭЛВ-15 с максимальной энергией до 3 МэВ, ЭЛВ-16 с максимальной энергией до 4 МэВ, ускоритель ЭЛВ-18 с энергией до 2 МэВ, и модификация ускорителя ЭЛВ-4Б. Даны детали процесса проектирования, расчета и тестирования. Рассматриваются особенности эксплуатации и вывода на рабочие параметры. Помимо этого, уделяется внимание текущему состоянию дел, связанных с ускорителями электронов серии ЭЛВ: разработкой, исследованиями, применением и поставками.

Ключевые слова

ускоритель электронов, ЭЛВ, радиационная модификация, сшивка полимеров, промышленный ускоритель

Для цитирования

Воробьев Д. С., Куксанов Н. К., Домаров Е. В., Голубенко Ю. И., Корчагин А. И., Салимов Р. А., Фадеев С. Н., Чакин И. К., Семенов А. В., Лаврухин А. В., Потапова Ю. Э. Новейшие модели ускорителей ЭЛВ с энергией до 4 МэВ // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 2. С. 80–87. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-80-87

\*Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

© Воробьев Д. С., Куксанов Н. К., Домаров Е. В., Голубенко Ю. И., Корчагин А. И., Салимов Р. А., Фадеев С. Н., Чакин И. К., Семенов А. В., Лаврухин А. В., Потапова Ю. Э., 2024

# Newest ELV Type Accelerators with up to 4 MeV Energy

Denis S. Vorobev<sup>1</sup>, Nikolay K. Kuksanov<sup>2</sup> Evgeny V. Domarov<sup>3</sup>, Yuri I. Golubenko<sup>4</sup> Aleksey I. Korchagin<sup>5</sup>, Rustam A. Salimov<sup>6</sup> Sergey N. Fadeev<sup>7</sup>, Ivan K. Chakin<sup>8</sup> Aleksey V. Semenov<sup>9</sup>, Alexander V. Lavrukhin<sup>10</sup> Yulia E. Potapova<sup>11</sup>

> Budker Institute of Nuclear Physics of SB RAS Novosibirsk, Russian Federation

> > <sup>1</sup>d.s.vorobev@inp.nsk.su
> > <sup>2</sup>n.k.kuksanov@inp.nsk.su
> > <sup>3</sup>e.v.domarov@inp.nsk.su
> > <sup>4</sup>yu.i.golubenko@inp.nsk.su
> > <sup>5</sup>a.i.korchagin@inp.nsk.su
> > <sup>6</sup>r.a.salimov@inp.nsk.su
> > <sup>7</sup>s.n.fadeev@inp.nsk.su
> > <sup>8</sup>i.k.chakin@inp.nsk.su
> > <sup>9</sup>a.v.semenov@inp.nsk.su
> > <sup>10</sup>a.v.lavrukhin@inp.nsk.su
> > <sup>11</sup>yu.e.potapova@inp.nsk.su

#### Abstract

The article represents new models of accelerators of the ELV series: ELV-15 with a maximum energy of up to 3 MeV, ELV-16 with a maximum energy of up to 4 MeV, an ELV-18 accelerator with an energy of up to 2 MeV, and a modification of the ELV-4 accelerator – ELV-4B. Details of the design, calculation and testing process are given. Features of operation and accelerators conditioning are considered. Attention is paid to the current state of development, research, application of ELV accelerators series.

#### Keywords

electron beam, accelerator, ELV, radiation processing, polymer crosslinking, industrial accelerator, DC accelerator For citation

Vorobev D. S., Kuksanov N. K., Domarov E. V., Golubenko Yu. I., Korchagin A. I., Salimov R. A., Fadeev S. N., Chakin I. K., Semenov A. V., Lavrukhin A. V., Potapova Yu. E. Newest ELV Type Accelerators with up to 4 MeV Energy. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 2, pp. 80–87 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-80-87

#### Введение

В 2023 г. исполнилось 50 лет с момента принятия межведомственной государственной комиссией ускорителя ЭЛВ-1, которая рекомендовала их к промышленному применению и массовому производству. За это время ускорители ЭЛВ прошли через множество модернизаций, разработку новых моделей, новых применений. И спустя полвека этот процесс продолжается и сегодня. Основной запрос со стороны пользователей ускорителей ЭЛВ – это увеличение энергии пучка ускоренных электронов. В ответ на него ИЯФ разработал и выпустил на рынок ускоритель ЭЛВ-15 с энергией до 3 МэВ и мощностью 100 кВт, а также в активной фазе находится разработка и производство ускорителя ЭЛВ-16 с максимальной энергией до 4 МэВ. Не остается в стороне и вопрос надежности эксплуатации ускорителей. Несмотря на то что ускорители серии ЭЛВ и так считаются одними из самых надежных машин в своем классе и области применения, обеспечивая непрерывную работу производственных линий в режиме 24/7, в Институте разрабатываются такие модели ускорителей, как ЭЛВ-18 (модификация ЭЛВ-8, с уменьшенной до 2 МэВ максимальной энергией, увеличенным до 67 мА током, и до 120 кВт мощностью) и ЭЛВ-4Б (1,5 МэВ, 67 мА, 100 кВт). Обе модели имеют разгруженный, с точки зрения высоковольтной прочности, выпрямитель, что еще больше повышает их надежность.

#### ЭЛВ-15

Разработка ускорителя ЭЛВ-15 началась в 2019 г., в 2020 г. началось изготовление, а в 2021 г. первый ускоритель был собран на испытательном стенде в Институте ядерной физики в Новосибирске, а в декабре отправлен первому заказчику в Китай [1].

В качестве исходной модели был взят ускоритель ЭЛВ-8. Сосуд имеет схожую коническую геометрию, как и первичная обмотка. Измерение энергии производится роторным вольтметром. Оптика пучка – стандартная для всей серии ускорителей ЭЛВ с возможностью установки выпускных устройств различных размеров (с шириной до четырех метров вдоль выпускного окна), а также комплектацией четырехсторонней и кольцевыми системами облучения.

#### Расчет

Впервые для расчета физических и геометрических параметров выпрямителя (размеры, количество витков первичной и вторичной обмоток, количество секций и пр.) мы применили метод параметрической экстраполяции, предположив, что сравнение расчетов, проведенных одним и тем же способом, параметров нового генератора и существующего аналогичного устройства значительно упростит процесс моделирования при сохранении достаточной точности. Само моделирование и сопутствующие ему расчеты были опубликованы в статье [2] и приводить их здесь будет излишним. Тем не менее хотелось бы отметить, что связка программного обеспечения SAM [3] и NL5 в очередной раз показала себя как замечательный инструмент для подобного рода моделирований.

По итогу расчетов было принято: высота первичной обмотки (состоящей из двух частей) – 3600 мм, количество секций вторичной обмотки – 80 (плюс три «пустые секции», состоящие только из экранов, без катушки), количество витков первичной обмотки – 33 (17 – нижняя часть и 16 – верхняя), количество витков катушки секции – 3000. Непосредственно ускорительная трубка состоит из четырех частей длиной 900 мм, с электронной пушкой, выполненной по схеме Пирса наверху и LaB6 катодом диаметром 10 мм.

Таблица 1

Параметры ускорителя	ЭЛВ-15
in painterpoi jenephitemi	00110 10

Table 1

	1
Параметр	Значение
Максимальная энергия	3,0 МэВ
Минимальная энергия	1,5 МэВ
Максимальный ток пучка	50 мА
Мощность	100 кВт
Пульсации энергии	2,5 %

ELV-15 accelerator parameters

# Тестирование

В 2021 г. производство компонентов ЭЛВ-15 было завершено, после чего сразу началась сборка на одном из стендов лаборатории в ИЯФ и, наконец, в третьем квартале того же года ускоритель был впервые запущен. Первые же включения оказались весьма обнадеживающими, поскольку благодаря «затвору» (созданию потенциальной «ямы» на первых электродах ускоряющей трубки), используемому практически на всех машинах, ускоритель менее чем за два дня вышел на свои предельные параметры, практически не потребовав процесса тренировки



*Puc. 1.* Ускоритель ЭЛВ-15 (без системы вывода пучка в атмосферу) *Fig. 1.* ELV-15 accelerator (without extraction device)

высоковольтных вакуумных зазоров, после чего в течение двух месяцев работал на максимальных энергии мощности и токе.

Стоит отметить, что в процессе тестирования была достигнута максимальная энергия 3.4 МэВ, в очередной раз подтвердив правильность расчетов и надежность полученного выпрямителя.

# Особенности ускорителя

Диаметр первичной обмотки был увеличен за счет увеличения диаметра выпрямительной секции и высоковольтного зазора в верхней части выпрямителя (из-за возросшего напряжения и желания уменьшить напряженность). В свою очередь это привело к увеличению индуктивно-

сти рассеяния первичной обмотки. Во время первых запусков мы обнаружили, что индуктивности согласующего дросселя недостаточно для получения максимальной мощности во всем диапазоне энергий. Были предложены три варианта в качестве решения возникшей проблемы: а) установить дополнительную схему, которая бы подключала дополнительные емкости к схеме согласования; б) сделать переключаемой частоту преобразователя частоты; в) изготовить дроссель с большей индуктивностью. Несмотря на то что у нас уже есть успешный опыт эксплуатации схем, подключающих дополнительные емкости, было решено доработать схемы и программное обеспечение до возможности переключения частоты инвертора на IGBT-транзисторах, а также изготовить новый дроссель. Позже было установлено: разница в частотах составляет около 12 %, т. е. на нижних энергиях ускоритель работает с частотой меньшей, чем на высоких (рабочая частота 400...500 Гц).

По итогам эксплуатации оказалось, что использование дросселя с увеличенной индуктивностью наиболее рационально, хотя схемная и программная реализация переключения частоты были сохранены в составе системы для возможных будущих ускорителей большой мощности и широким диапазоном энергии.

Первый ускоритель был отправлен заказчику осенью 2021 г. и в четвертом квартале того же года был собран, запущен, выведен на рабочие параметры и передан в эксплуатацию. На сегодняшний день уже поставлено 5 таких ускорителей.

## ЭЛВ-18 и ЭЛВ-4Б

Из-за возросшей производительности линий (производство кабеля различных типов, термоусаживаемых трубок, вспененного полиэтилена), в современных производствах число незапланированных отключений ускорителя должно быть минимизировано не более одного за 8 часов работы. Под отключениями здесь подразумеваются отключения, связанные со срабатываниями блокировок и защит систем ускорителя: прохождение пучка, работа оптики пучка, работа высоковольтного выпрямителя, системы питания. В них не входят причины, связанные с внешними вспомогательными системами, такими как водяное охлаждение, воздушное охлаждение, вытяжка озона и пр. Для сравнения: 20 лет назад допустимым считалось одно отключение ускорителя за 2 часа. Сейчас же требования стали гораздо строже.

Помимо вышесказанного, производительность напрямую зависит от мощности дозы получаемой продукции, которая, в свою очередь, прямо пропорционально связана с током пучка. Повышение максимального тока и мощности ускорителей напрямую увеличивает производительность линий.





#### ЭЛВ-18

Ускоритель ЭЛВ-18 является овеществленным опытом эксплуатации ускорителей ЭЛВ-8 и ЭЛВ-4. Зачастую для сшивки (полимеризации) изоляции кабельной продукции средних сечений наиболее оптимальная энергия лежит в диапазоне 1,62,0 МэВ. Если раньше перекрытие этого диапазона было возможно только с применением ускорителей ЭЛВ-8 или ЭЛВ-15, то теперь мы можем предложить ускоритель с повышенной мощностью в 120 кВт и максимальным током в 67 мА. По сравнению с ускорителем ЭЛВ-8 в ЭЛВ-18 количество секций уменьшено до 58, а ускорительная трубка короче на 30 см.

### ЭЛВ-4Б

Ускорители ЭЛВ-4 считаются одними из самых массовых, являясь «рабочей лошадкой» для производства термоусаживаемой трубки, поскольку большая часть производства таких трубок приходится на небольшие диаметры, с малой толщиной стенки, большой энергии не требуют. Для повышения надежности и качества эксплуатации было предложено изменить геометрию высоковольтного выпрямителя.

Изменения затронули верхний и нижний диаметры первичной обмотки и число ее витков. Верхний диаметр увеличен для повышения высоковольтной прочности, нижний для облегчения доступа к секциям вторичной обмотки во время сборки и сервисного обслуживания (на основе опыта), количество витков уменьшено с 33 до 32 для выравнивания поля вдоль оси. Это привело к уменьшению напряженности поля (особенно в высоковольтной части) и, соответственно, к увеличению высоковольтной прочности, надежности и качества эксплуатации ускорителя. Моделирование проводилось в программе WinSAM, и в ближайшем времени отчет будет опубликован в виде статьи и постера на одной из конференций.



Рис. 3. Ускорители ЭЛВ-18 (слева) и ЭЛВ-16 (справа) Fig. 3. ELV-18 (on left side) and ELV-16 (on right)

### ЭЛВ-16

Логичным шагом, после создания ускорителя ЭЛВ-15, стало проектирование ускорителя с максимальной энергией 4 МэВ. Пучки таких энергий дают возможность еще больше расширить сферу применения ускорителей ЭЛВ, позволив более широко включить такие области, как, например, стерилизация изделий и продуктов питания, установка гамма-конвертеров в качестве мишени, и, конечно, радиационная сшивка кабельной продукции с изоляцией больших размеров, или вспененного полиэтилена большей толщины.

Модель, получившая название ЭЛВ-16, будет состоять из трех конических первичных обмоток, расположенных в цилиндрическом сосуде (в качестве изоляции по-прежнему используется SF6). Вторичная обмотка состоит из секций большего диаметра (по сравнению со стандартными секциями ЭЛВ) в количестве 102 штук плюс три «пустые» секции (без катушки) в верхней части выпрямителя. Ускорительная трубка состоит из 5 частей длиной 90 см, причем апертура и диаметр керамических колец трубки увеличены.

В настоящий момент завершается проектирование узлов ускорителя. Ожидается, что в следующем году начнется производство пилотной модели.

Таблица 2

# Параметры ускорителей ЭЛВ-18 и ЭЛВ-16

Table 2

Параметр	ЭЛВ-18	ЭЛВ-16
Максимальная энергия	2,0 МэВ	4,0 МэВ
Минимальная энергия	1,0 МэВ	2,0 МэВ
Максимальный ток пучка	67 мА	40 мА
Мощность	120 кВт	120 кВт
Пульсации энергии	2,5 %	2,5 %

ELV-18 and ELV-16 parameters

# Заключение

Производство радиационно-сшитой продукции и сферы применения электронных пучков растут с каждым годом. Следуя этим тенденциям и пожеланиям пользователей ускорителей ЭЛВ, Институт ядерной физики занимается разработкой новых моделей ускорителей и улучшением характеристик существующих. Повышение мощности, надежности, расширение диапазона энергий позволят расширить области использования радиационной модификации электронами.

### Список литературы

- 1. Vorobev D., Domarov E., Kuksanov N. et. al. ELV-15 new accelerator for industrial applications // Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE–2022). Tomsk, Russia. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-23-33
- 2. Куксанов Н. К., Воробьев Д. С., Салимов Р. А., Фадеев С. Н. Источник высоковольтного питания ускорителя ЭЛВ-15 // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 1. С. 23–33. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-23-33
- 3. Тарнецкий В. В., Тиунов М. А., Яковлев В. П. Комплекс программ «SAM». Руководство пользователя. Новосибирск, 2002.

### References

- 1. Vorobev D., Domarov E., Kuksanov N., et. al. ELV-15 new accelerator for industrial applications // Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE–2022) | Tomsk, Russia. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-23-33
- Kuksanov N. K., Vorobev D. S., Salimov R. A., Fadeev S. N. The High Voltage Source for the ELV-15 Accelerator. Siberian Journal of Physics, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 23–33. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-23-33
- 3. Tarnetskiy V. V., Tiunov M. A., Yakovlev V. P. Complex of programs SAM. User's manual. Novosibirsk, 2002. (in Russ.)

# Сведения об авторах

Воробьев Денис Сергеевич, ведущий инженер

Куксанов Николай Константинович, доктор технических наук, главный научный сотрудник Домаров Евгений Вадимович, научный сотрудник

Голубенко Юрий Иванович, старший научный сотрудник

Корчагин Алексей Иванович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Салимов Рустам Абельевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник

Фадеев Сергей Николаевич, кандидат технических наук, заведующий лабораторией

Чакин Иван Константинович, инженер-исследователь

Семенов Алексей Вячеславович, научный сотрудник

Лаврухин Александр Владимирович, ведущий инженер

Потапова Юлия Эдуардовна, старший лаборант

# Information about the Authors

Denis S. Vorobev, Lead Engineer

Nikolay K. Kuksanov, Doctor, Chief Researcher

Evgeny V. Domarov, Researcher

Yuri I. Golubenko, Senior Researcher

Aleksey I. Korchagin, PhD, Senior Researcher

Rustam A. Salimov, Doctor, Chief Researcher

Sergey N. Fadeev, PhD, Laboratory Head

Ivan K. Chakin, Engineer-Researcher

Aleksey V. Semenov, Researcher

Alexander V. Lavrukhin, Lead Engineer

Yulia E. Potapova, Senior Laboratory Assistant

Статья поступила в редакцию 11.09.2023; одобрена после рецензирования 15.09.2023; принята к публикации 20.02.2024

The article was submitted 11.09.2023; approved after reviewing 15.09.2023; accepted for publication 20.02.2024

Научная статья

УДК 533.9.082.7 DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-88-94

# О влиянии условий фокусировки на эмиссионную способность лазерно-плазменного источника ионов\*

# Евгений Дмитриевич Вовченко<sup>1</sup>, Константин Иванович Козловский<sup>2</sup> Сергей Маркович Полозов<sup>3</sup>, Александр Евгеньевич Шиканов<sup>4</sup> Екатерина Алексеевна Морозова<sup>5</sup>, Антон Алексеевич Исаев<sup>6</sup>

<sup>1-5</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» Москва, Россия

<sup>6</sup>Российский технологический университет «МИРЭА» Москва, Россия

<sup>1</sup>edvovchenko@mail.ru <sup>2</sup>cozlowskij2013@yandex.ru <sup>3</sup>SMPolozov@mephi.ru <sup>4</sup>aeshikanov14@mail.ru <sup>5</sup>e.a.morozova137@gmail.com <sup>6</sup>isaev@lenta.ru

Аннотация

Рассмотрены вопросы влияния геометрических условий фокусировки лазерного излучения на поверхность плазмообразующей мишени лазерно-плазменного источника ионов. В частности, экспериментально установлено наличие двух максимумов ионной эмиссии в области плотности потока лазерного излучения, превышающего 1015 Вт/м<sup>2</sup>. Предложена возможная интерпретация этого эффекта.

#### Ключевые слова

лазерная плазма, инжектор, ускоритель ионов, дейтрон, плазма, ток дейтронов, лазерно-плазменный источник Для цитирования

Вовченко Е. Д., Козловский К. И., Полозов С. М., Шиканов А. Е., Морозова Е. А., Исаев А. А. О влиянии условий фокусировки на эмиссионную способность лазерно-плазменного источника ионов // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 2. С. 88–94. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-88-94

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup>Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

<sup>©</sup> Вовченко Е. Д., Козловский К. И., Полозов С. М., Шиканов А. Е., Морозова Е. А., Исаев А. А., 2024

# On the Effect of Focusing Conditions on the Emission Capacity of a Laser-Plasma Ion Source

Evgeny D. Vovchenko<sup>1</sup>, Konstantin I. Kozlovskij<sup>2</sup>, Sergey M. Polozov<sup>3</sup> Alexander E. Shikanov<sup>4</sup>, Ekaterina A. Morozova<sup>5</sup>, Anton A. Isaev<sup>6</sup>

> <sup>1-5</sup>National Research Nuclear University "MEPhI" Moscow, Russian Federation

<sup>6</sup>Russian Technological University "MIREA" Moscow, Russian Federation

> <sup>1</sup>edvovchenko@mail.ru <sup>2</sup>cozlowskij2013@yandex.ru <sup>3</sup>SMPolozov@mephi.ru <sup>4</sup>aeshikanov14@mail.ru <sup>5</sup>e.a.morozova137@gmail.com <sup>6</sup>isaev@lenta.ru

#### Abstract

The issues of the influence of geometric conditions of laser radiation focusing on the surface of the plasma-forming target of an laser-plasma ion source are considered. In particular, the presence of two ion emission maxima in the region of the laser radiation flux density exceeding 1011 W/m2 has been experimentally established. A possible interpretation of this effect is proposed.

#### Keywords

лазерная плазма, инжектор, ускоритель ионов, дейтрон, плазма, ток дейтронов, лазерно-плазменный источник For citation

Vovchenko E. D., Kozlovskij K. I., Polozov S. M., Shikanov A. E., Morozova E. A., Isaev A. A. On the Effect of Focusing Conditions on the Emission Capacity of a Laser-Plasma Ion Source. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 2, pp. 88–94 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-88-94

### Введение

В настоящее время в результате усовершенствования лазерной техники получили широкое развитие различные перспективные технологии с использованием лазерной плазмы [1; 2]. К ним относятся масс-спектрометрический элементный анализ состава вещества [1–3], инерциальный термоядерный синтез [1; 4], генерация нейтронов и мягких рентгеновских квантов [1; 5; 6], осаждение тонкопленочных покрытий [1; 7], физическое моделирование взрывных процессов [1; 8], инжектирование ионов в резонансные ускорители заряженных частиц [9–11].

Данная работа посвящена вопросам повышения эффективности лазерно-плазменного инжектора для резонансного линейного ускорителя ионов (ЛУИ) типа ПОКФ (поперечно-однородная квадрупольная фокусировка) [12] в части увеличения его эмиссионной способности. Для этого был проведен эксперимент с лазерно-плазменным источником дейтронов (ЛПИД), при котором плазма образовывалась при фокусировке лазерного излучения на мишень в виде таблетки из дейтерида титана с коэффициентом стехиометрии по дейтерию  $\chi \sim 1$ .

На рис. 1 представлена схема формирования дейтронного потока, используемая в эксперименте по физическому моделированию такого ЛПИД.

Плазма образовывалась при плотности потока лазерного излучения  $q \sim (10^{14} \div 10^{16})$  Вт/м<sup>2</sup>. В экспериментах использовался твердотельный лазер на гранате, активированном неодимом, генерирующий импульс излучения с длиной волны  $\lambda = 1,06$  мкм, энергией  $E_{\Pi} \sim 1$  Дж и длительностью  $\tau_{\Pi} \sim 10$  нс. Оптическая система позволяла фокусировать излучение в пятно с радиусом, выбираемым в диапазоне  $a = (2 \div 5) \cdot 10^{-4}$  м и определяющим начальный размер плазменного образования.





#### Основное содержание

В монографии [1] на основе экспериментальных данных показано, что за время срабатывания лазера плазма разогревается до температуры, определяемой по формуле:

$$\theta \approx 10^{-6} q^{\frac{4}{9}} = 10^{-6} \left( \frac{E_{\pi}}{S \tau_{\pi}} \right)^{\frac{4}{9}},$$

где  $S = \pi a^2$  – площадь пятна фокусировки лазерного излучения на мишень, a – радиус пятна фокусировки. При этом около, как отмечается в [1], 70 % энергии лазерной вспышки переходит в кинетическую  $E_{\kappa}$  и тепловую  $E_{\tau}$  энергии плазмы.

Параллельно происходит одновременное увеличение скорости расширения плазменного фронта до некоторого предельного значения *V* ~ 10<sup>5</sup> м/с и кинематика расширения плазменного образования принимает асимптотический автомодельный характер с полем скоростей вида:

$$V(r,t) = V\frac{r}{R},\tag{1}$$

где *r* – радиус-вектор, *t* – время, *R* – радиус плазменной сферы. На модельном уровне [6] можно считать, что ее центр перемещается со скоростью расширения самой сферы.

К моменту десятикратного расширения лазерной плазмы от начального размера в ней практически прекращаются столкновения частиц и происходит «закалка ионизационного состояния» [1; 3].

Следуя работам [1; 6], будем считать процесс расширения плазмы, начиная с момента  $t_0 \approx 10a/V$ , близким к адиабатическому с показателем  $\gamma = 5/3$ , полагая, в соответствии с монографиями [3; 13], выполнение следующих связей между энергетическими характеристиками плазменного сгустка:

$$E_{\rm K} \approx 0.7 \frac{4\gamma}{\left(\gamma+1\right)^2} E_{\rm JI} = \frac{21}{32} E_{\rm JI}, E_{\rm T} \approx 0.7 \left(\frac{\gamma-1}{\gamma+1}\right)^2 E_{\rm JI} = \frac{7}{160} E_{\rm JI}.$$

ISSN 2541-9447 Сибирский физический журнал. 2024. Том 19, № 2 Siberian Journal of Physics, 2024, vol. 19, no. 2 На стадии полного разогрева каждая частица плазмы имеет энергию  $3e\theta/2$ , где e – элементарный электрический заряд. Тогда, используя принцип равнораспределения энергии по степеням свободы и полученные выше энергетические соотношения, находим связь начального числа ионов в полностью ионизованной плазме с энергией лазерного импульса:

$$\frac{7}{160}E_{\rm JI}\approx\frac{3eN_{do}\theta}{2\gamma}(2\chi+Z+1) \ [9B],$$

где Z – порядковый номер металла-носителя мишени (в данном случае титана Z = 22).

Из этого выражения, с учетом коэффициента «закалки» ионизационного состояния плазмы по дейтерию  $k \le 0,1$ , получаем окончательное выражение для оценки полного числа дейтронов в лазерной плазме в виде приближенной зависимости:

$$N_{d} \approx 3 \cdot 10^{23} ka^{\frac{8}{9}} \frac{\chi E_{JI}^{\frac{5}{9}} \tau_{L}^{\frac{4}{9}}}{2\chi + Z + 1} \sim \left(10^{14} - 10^{16}\right).$$
(2)

Сделанные в соответствии с этими формулами оценки параметров плазмы дают значения в пределах ~(10<sup>15</sup> – 10<sup>16</sup>) частиц, при указанных выше параметрах оптической системы, что находится в соответствии с экспериментальными данными, опубликованными в работах [1; 14].

Кинематика лазерной плазмы внутри вакуумной камеры определялась приближенной моделью разлета, описанной в работах [64; 15; 16]. Она предполагает линейную зависимость (1) поля скоростей от радиуса r, а также наличие четких переднего и заднего плазменных фронтов сферической формы с радиусами соответственно  $R_1$  и  $R_2$ , движущихся со скоростями  $V_1 \sim 10^5$  м/с и  $V_2 \sim 10^4$  м/с, что является следствием известных экспериментальных данных [14]. При этом дейтериевый компонент в пролетной трубе длиной  $H_t \gg R_t$  опережает металлический, и их движение можно рассматривать независимо друг от друга на поздних стадиях разлета.

Как отмечалось выше, кинематическая модель предполагает, что сгусток лазерной плазмы представляет собой шар, расширяющийся со скоростью  $V_1$ , центр которого одновременно смещается с такой же скоростью в направлении нормали к поверхности мишени, а поверхность переднего фронта плазмы задается уравнением:

$$x^{2} + y^{2} = R(t)^{2} - [z - R(t)]^{2}$$
.

Такое представление успешно использовалось при расчетах ускорительных трубок с лазерным источником дейтронов (см., например, [17]).

В эксперименте на вход трубки дрейфа попадало

$$N_{d1} \approx N_d \left(\frac{R_t}{R_1}\right)^2$$

дейтронов, которые замагничивались в пролетной трубе полем длинного соленоида, а извлекались с торца электрическим полем в объем коллектора (цилиндра Фарадея с входным диаметром *D*). Подобная методика измерений подробно описана в монографиях [2; 3]. Она позволяла собирать в коллекторе за один импульс заряд дейтронов, оцениваемый по формуле:

$$Q_d \approx N_d \left(\frac{D}{2R_1}\right)^2,$$

на уровне ~ $(10)^{-8}$  Кл, что было вполне приемлемо для проведения эксперимента.

#### Заключение

В процессе эксперимента осуществлялось варьирование расстояния *L* между фокусирующей линзой и лазерной мишенью, определяющее условия фокусировки. На рис. 2 представлены соответствующие зависимости тока дейтронов фиксируемого цилиндром Фарадея на выходе ЛПИД от расстояния *L*, выражаемого в единицах фокуса линзы *F*.



Рис. 2. Зависимости тока дейтронов на выходе ЛПИД от расстояния L между мишенью и линзой, отнесенного к ее фокусному расстоянию F Fig. 2. Dependences of the deuteron current at the output of a laser-plasma deuteron source on the distance L

Fig. 2. Dependences of the deuteron current at the output of a laser-plasma deuteron source on the distance L between the target and the lens, related to its focal length F

Как видно из рис. 2, зависимость дейтронного потока от расстояния между линзой и лазерной мишенью имеет два максимума. Этот факт можно объяснить тем, что при их реализации разность между скоростями ионизации и рекомбинации в плазме достигает максимального значения, и реализуются оптимальные условия «закалки» ионизационного состояния плазмы, соответствующие максимальным значениям параметра  $G = ka^{8/9}$ . При этом большой максимум на кривой соответствует расположению линзы вблизи мишени, а меньший вдали от нее. В этом случае плотность потока лазерного излучения в области его взаимодействия с плазмой больше, чем при расположении фокуса за мишенью, что приводит к превалированию процесса ионизации над процессом рекомбинации при их конкуренции на столкновительной стадии разлета плазмы.

Кроме того, в первом случае меньше апертура лазерного луча в области оптического окна вакуумной камеры, что способствует уменьшению аберрационных эффектов, вызываемых возможными неоднородностями поверхности окна и углом наклона потока излучения.

# Список литературы

- 1. Ананьин О. Б., Быковский Ю. А., Крохин О. Н. и др. Лазерная плазма // Физика и применения. М.: МИФИ, 2003. 400 с.
- 2. Сильнов С. М. Лазерная плазма на поздних стадиях разлета // Эксперимент, физика, масс-спектрометрия. М.: ЧеРо. 2007. 274 С.
- 3. Быковский Ю. А., Неволин В. Н. Лазерная масс-спектрометрия. М.: Атомиздат. 1985. 130 с.
- 4. Афанасьев Ю. В., Басов Н. Г. Лазерный термоядерный синтез // Серия: Наука и человечество. М.: Знание. 1981. С. 131–151.

- 5. Ananin O. B., Tsybin A. S. et al. Prospects for developing a small neutron generator with a laser deuteron source // Atomic Energy. 2013. № 115(2). P. 137–141.
- 6. Shikanov A. E. Model of spherical ion diode with laser-plasma anode for neutron generation // Plasma Physics Reports. 2021. № 47(4). P. 377–383.
- 7. Гулько В. М., Коломиец Н. Ф. и др. Конструирование нейтронной трубки с лазерным ионным источником // Атомная энергия. 1982. Т. 52, вып. 4. С. 271–272.
- 8. **Ripin B. H., Manka C. K. et al.** Lab. laser-produced astrophysical-like plasmas // Laser and Particle Beams. 1990. Vol. 7. P. 183–191.
- 9. Ананьин О. Б., Быковский Ю. А. и др. Осуществление ускорения ионов лазерной плазмы на циклотроне // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 17. Вып. 9. С. 460–463.
- 10. Ананьин О. Б., Балдин А. М., Безногих Ю. Д. и др. Об осуществлении ускорения ядер углерода, полученных в лазерном инжекторе, на синхрофазотроне Объединенного института ядерных исследований // Квантовая электроника. 1977. № 4(7). С. 1547–1553.
- 11. Govorov A. I., Kalagin I. V., Monchinsky V. A. Laser ion source of Synchrophasotron and Nuclotron in Dubna // Laser and Particle Beams. 1996. № 14(3). P. 439–442.
- 12. Богданович Б. Ю., Нестерович А. В. и др. Дистанционный радиационный контроль с линейными ускорителями. М.: Энергоатомиздат, 2009. Т. 1. 272 с.
- 13. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М. Физматлит. 2008. 654 с.
- 14. Вергун И. И., Козловский К. И., Козырев Ю. П. и др. Исследование интенсивного лазерного источника дейтронов // Журнал технической физики. 1979. Т. 49, № 5. С. 2003–2006.
- Дыдычкин В. Н., Шиканов А. Е. Генерация коротких (<100 нс) нейтронных импульсов в малогабаритных ускорительных трубках с лазерным ионным источником // Атомная энергия. Т. 70, вып. 2. 1991. С. 135–137.
- Вовченко Е. Д., Козловский К. И., Шатохин В. Л. и др. Модель ускорения лазерной плазмы в полях спиральной электродинамической линии // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 49, вып. 3. С. 59–62.
- 17. Войтенко В. А., Гулько В. М. и др. Ускорительная нейтронная трубка с лазерным ионным источником // ПТЭ. 1988. № 5. С. 34–35.

# References

- 1. Ananyin O. B., Bykovsky Yu. A., Krokhin O. N. et al. Laser plasma. In: *Physics and Applications*. Moscow, MEPHI publ., 2003, 400 p. (in Russ.)
- 2. Silnov S. M. Laser plasma in the late stages of expansion. *Experiment, physics, mass spectrometry*. Moscow, Chero publ., 2007, 274 p. (in Russ.)
- 3. **Bykovsky Yu.A., Nevolin V. N.** Laser mass spectrometry. Moscow, Atomizdat publ., 1985, 130 p. (in Russ.)
- 4. Afanasyev Yu. V., Basov N. G. Laser thermonuclear synthesis. *Series "Science and humanity"*. Moscow, Znanie publ., 1981, pp. 131–151. (in Russ.)
- 5. Ananin O. B., Tsybin A. S. et al. Prospects for developing a small neutron generator with a laser deuteron source. *Atomic Energy*, 2013, no. 115(2), pp. 137–141.
- 6. Shikanov A. E. Model of spherical ion diode with laser-plasma anode for neutron generation. *Plasma Physics Reports*, 2021, no. 47(4), pp. 377–383.
- 7. Gulko V. M., Kolomiets N. F. et al. Construction of a neutron tube with a laser ion electrode. *Atomic Energy*, 1982, vol. 52, no. 4, pp. 271–272. (in Russ.)
- 8. Ripin B. H., Manka C. K. et al. Lab. laser-produced astrophysical-like plasmas. *Laser and Particle Beams*, 1990, vol. 7, pp. 183–191.
- 9. Ananyin O. B., Bykovsky Yu. A. et al. Acceleration of laser plasma ions on a cyclotron. *Letters to the JETF*, 1973, vol. 17, no. 9, pp. 460–463. (in Russ.)

- Ananyin O. B., Baldin A. M., Beznogikh Yu. D. et al. On the implementation of acceleration of carbon nuclei produced in a laser injector at the synchrophasotron of the Joint Institute for Nuclear Research. *Quantum Electronics*, 1977, no. 4(7), pp. 1547–1553. (in Russ.)
- 11. Govorov A. I., Kalagin I. V., Monchinsky V. A. Laser ion source of Synchrophasotron and Nuclotron in Dubna. *Laser and Particle Beams*, 1996, vol. 14(3), pp. 439–442.
- 12. Bogdanovich B. Yu., Nesterovich A. V. et al. Remote radiation monitoring with linear accelerators. Moscow, Energoatomizdat publ., 2009, vol. 1, 272 p. (in Russ.)
- 13. Zeldovich Ya. B., Raiser Yu. P. Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena. Moscow, FIZMATLIT publ., 2008, 654 p. (in Russ.)
- 14. Vergun I. I., Kozlovsky K. I., Kozyrev Yu. P. et al. Study of an intense laser source of deuterons. *Journal of Technical Physics*, 1979, vol. 49, no. 5, pp. 2003–2006. (in Russ.)
- Dydychkin V. N., Shikanov A. E. Generation of short (<100 ns) neutron pulses in small-sized accelerating tubes with a laser ion source. *Atomic Energy*, 1991, vol. 70, iss. 2, 1991, pp. 135– 137. (in Russ.)
- Vovchenko E. D., Kozlovsky K. I., Shatokhin V. L. et al. Model of laser plasma acceleration in the fields of a spiral electrodynamic line. *Letters to the JETF*, 2019, vol. 49, iss. 3, pp. 59–62. (in Russ.)
- 17. Voitenko V. A., Gulko V. M. et al. Accelerator neutron tube with laser ion source. *INET*, 1988, no. 5, pp. 34–35. (in Russ.)

# Сведения об авторах

Вовченко Евгений Дмитриевич, кандидат физико-математических наук

Козловский Константин Иванович, кандидат физико-математических наук

Полозов Сергей Маркович, доктор физико-математических наук

Шиканов Александр Евгеньевич, доктор технических наук

Морозова Екатерина Алексеевна, студентка

Исаев Антон Алексеевич, кандидат технических наук

# Information about the Authors

**Evgeny D. Vovchenko**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences **Konstantin I. Kozlovskij**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences **Sergey M. Polozov**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences **Alexander E. Shikanov**, Doctor of Technical Sciences **Ekaterina A. Morozova**, Student

Anton A. Isaev, Candidate of Technical Sciences

Статья поступила в редакцию 19.09.2023; одобрена после рецензирования 08.12.2023; принята к публикации 05.03.2024

The article was submitted 19.09.2023; approved after reviewing 08.12.2023; accepted for publication on 05.03.2024

Научная статья

УДК 532.526 DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-95-110

# Экспериментальное исследование развития волнового поезда в продольном следе в пограничном слое плоской пластины при числе Maxa 2,5

# Марина Владимировна Питеримова<sup>1</sup>, Александр Дмитриевич Косинов<sup>2</sup> Николай Васильевич Семёнов<sup>3</sup>, Алексей Анатольевич Яцких<sup>4</sup> Александра Валерьевна Шмакова<sup>5</sup>, Юрий Геннадьевич Ермолаев<sup>6</sup> Борис Владимирович Смородский<sup>7</sup>

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН Новосибирск, Россия

<sup>1</sup>piterimova@itam.nsc.ru
 <sup>2</sup>kosinov@itam.nsc.ru
 <sup>3</sup>semion@itam.nsc.ru
 <sup>4</sup>73.yatskikh@gmail.com
 <sup>5</sup>avpanina@itam.nsc.ru
 <sup>6</sup>yermol@itam.nsc.ru
 <sup>7</sup>smorodsk@itam.nsc.ru

#### Аннотация

В работе рассматриваются экспериментальные результаты по развитию волнового поезда в продольном следе в пограничном слое плоской пластины при числе Maxa 2,5. Выполнен анализ пространственно-временных распределений и частотно-волновых спектров пульсаций, а также их волновых характеристик в линейной и слабонелинейной фазе развития волнового поезда в однородном и неоднородном пограничном слое при фиксированной мощности источника контролируемых возмущений. В ходе анализа результатов субгармонический резонанс не наблюдался. Разложение по волновому спектру стационарной неоднородности и экспериментальные данные о волновых характеристиках и спектрах возмущений позволили предложить варианты взаимодействия волн для режима наклонного перехода.

#### Ключевые слова

сверхзвуковой поток, экспериментальные исследования, плоская пластина, контролируемые возмущения, на-клонный переход

#### Финансирование

Работа выполнена по теме государственного задания. Эксперименты проведены с использованием оборудования ЦКП «Механика» (ИТПМ СО РАН).

### Для цитирования

Питеримова М. В., Косинов А. Д., Семёнов Н. В., Яцких А. А., Шмакова А. В., Ермолаев Ю. Г., Смородский Б. В. Экспериментальное исследование развития волнового поезда в продольном следе в пограничном слое плоской пластины при числе Маха 2,5 // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 2. С. 95–110. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-95-110

© Питеримова М. В., Косинов А. Д., Семёнов Н. В., Яцких А. А., Шмакова А. В., Ермолаев Ю. Г., Смородский Б. В., 2024

# Experimental Study of the Wave Train Development in a Longitudinal Trace in the Fat Plate Boundary Layer at Mach 2.5

Marina V. Piterimova<sup>1</sup>, Alexander D. Kosinov<sup>2</sup>, Nikolay V. Semionov<sup>3</sup> Aleksey A. Yatskikh<sup>4</sup>, Alexandra V. Shmakova<sup>5</sup>, Yuri G. Yermolaev<sup>6</sup> Boris V. Smorodsky<sup>7</sup>

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of SB RAS Novosibirsk, Russian Federation

> <sup>1</sup>piterimova@itam.nsc.ru <sup>2</sup>kosinov@itam.nsc.ru <sup>3</sup>semion@itam.nsc.ru <sup>4</sup>73.yatskikh@gmail.com <sup>5</sup>avpanina@itam.nsc.ru <sup>6</sup>yermol@itam.nsc.ru <sup>7</sup>smorodsk@itam.nsc.ru

#### Abstact

The paper discusses experimental results on the wave train development in a longitudinal trace in the flat plate boundary layer at Mach 2.5. An analysis of the spatiotemporal distributions and frequency-wave spectra of pulsations, as well as their wave characteristics in the linear and weakly nonlinear phase of the wave train development in a homogeneous and inhomogeneous boundary layer at a fixed power of the controlled disturbances source has been carried out. During the analysis of the results, no subharmonic resonance was observed. Expansion into the wave spectrum of a stationary inhomogeneity and experimental data on wave characteristics and disturbance spectra made it possible to propose options for wave interaction for oblique breakdown.

#### Keywords

supersonic flow, experimental studies, flat plate, controlled disturbances, oblique breakdown

Funding

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. The study was conducted at the Equipment Sharing Center «Mechanics» of ITAM SB RAS.

For citation

Piterimova M. V., Kosinov A. D., Semionov N. V., Yatskikh A. A., Shmakova A. V., Yermolaev Yu. G., Smorodsky B. V. Experimental study of the wave train development in a longitudinal trace in the fat plate boundary layer at Mach 2.5. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 2, pp. 95–110 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-95-110

#### Введение

Воздействие слабых ударных волн в виде N-волны на переднюю кромку плоской пластины с острой передней кромкой порождает стационарный продольный след в сверхзвуковом пограничном слое [1]. Сформировавшееся неоднородное в трансверсальном направлении течение изменяет механизмы ламинарно-турбулентного перехода в сверхзвуковом пограничном слое в сравнении с его однородным состоянием [2; 3]. Известно, что продольные следы (стрики) либо затягивают переход в пограничном слое вниз по потоку, либо сдвигают его вверх по течению, как отмечено в [2].

Намеренное введение продольных следов в пограничный слой актуально из-за их способности затягивать ламинарно-турбулентный переход (ЛТП), обычно в условиях высокого уровня турбулентности потока, что подтверждается при дозвуковых скоростях [4–8]. Это связано с изменением условий порождения мод пограничного слоя, их линейного развития и выделения наиболее растущих пульсаций, нелинейное взаимодействие которых разрушает ламинарное течение [9; 10]. Знание механизмов взаимодействия неустойчивых возмущений обычно существенно облегчает решение задач численного моделирования ЛТП и предсказание его положения в пограничном слое. При моделировании используются два метода: прямое численное моделирование на основе уравнений Навье – Стокса и проведение расчетов с использованием волнового подхода теории гидродинамической устойчивости. Экспериментальные данные востребованы при сравнении с теорией. Введение в сверхзвуковой пограничный слой искусственных волновых поездов позволяет получить требуемые для сравнения с расчетами экспериментальные данные [11]. Это реализуется с помощью анализа пространственно-временных распределений, частотно-волновых спектров пульсаций и их волновых характеристик в линейной и слабонелинейной фазе развития волнового поезда в однородном и неоднородном пограничном слое при условии фиксированной мощности локального источника контролируемых возмущений. Анализ данных позволяет определить возможные механизмы взаимодействия волн в однородном и неоднородном пограничном слое на плоской пластине и сравнить их друг с другом. В этом заключается основная цель данной работы, которая является четвертой в серии экспериментальных исследований, начатых в [12] при числе Маха 2.

#### Постановка эксперимента

Эксперименты проведены в сверхзвуковой аэродинамической трубе T325 ИТПМ СО РАН при числе Маха 2,5 и единичном числе Рейнольдса  $Re_1 = \frac{U}{v}$  (8,0 ± 0,1) × 10<sup>6</sup> м<sup>-1</sup>.

Термоанемометром постоянного сопротивления (ТПС) измерялись средние и пульсационные характеристики потока. Датчик термоанемометра с помощью координатного устройства перемещался по пространству: вдоль потока по оси *x*, поперек набегающего потока по оси *z* и по вертикали по оси *y*. Перегрев нити датчика задавался примерно равным 1,8. Параметры течения в рабочей части T-325 регистрировались с помощью автоматизированной системы измерения. Постоянное напряжение на выходе термоанемометра (Е) измерялось с помощью мультиметра Agilent 34401A, а его переменная составляющая записывалась в память персонального компьютера 12-разрядным аналогово-цифровым преобразователем (АЦП) с частотой дискретизации 750 кГц. В каждой точке по пространству проводилось по четыре измерения всех параметров потока и осциллограмм пульсаций длиной 65536 отсчетов. Осциллограммы синхронизировались с источником контролируемых измерений.

Использовалась плоская стальная пластина с источником контролируемых возмущений, которая ранее применялась в экспериментах по исследованию слабонелинейной эволюции волнового поезда в [13]. Модель длиной 450 мм, шириной 200 мм и толщиной 10 мм устанавливалась в рабочей части аэродинамической трубы под нулевым углом атаки. Радиус цилиндрической части передней кромки был (0,039 ± 0,002) мм. Передняя кромка имела скос в нижней части модели. Угол скоса составлял около 14°30'.

Для генерации контролируемых возмущений использовался высокочастотный тлеющий разряд в камере внутри модели, такой же, как описано в [11; 12]. Искусственные возмущения из электроразрядной камеры проникали в пограничный слой через отверстие диаметром 0,45 мм в поверхности пластины на удалении 35 мм от передней кромки. Для зажигания тлеющего разряда использовалось синусоидальное напряжение с генератора ГЗ-112/1 и усилитель мощности (200 Вт) с выходным трансформатором на напряжение амплитудой до 1000 В. Частота генератора поддерживалась стабильной в диапазоне  $f_{reн} = 9992-9996$  Гц при измерениях в неоднородном пограничном слое и  $f_{reн} = 9998$  Гц – в однородном. Зажигание разряда про-исходило дважды за период синусоидального сигнала, таким образом, основная частота контролируемых возмущений, вводимых в пограничный слой, составляла 2 ×  $f_{ren}$ . При выполнении данных исследований электрическая мощность на источнике возмущений фиксировалась и была такой же, как в [11; 12].

Измерения *N*-волны выполнялись в свободном потоке перед моделью в сечении x = -10 мм. Внутри однородного и неоднородного пограничного слоя возмущения измерялись в сечениях x = 60, 100, 110 и 120 мм.

Для введения в поток *N*-волны использовалась двумерная ПВХ-лента, которая была наклеена на боковую стенку рабочей части трубы и вводила в поток пару слабых ударных волн. Лента имела ширину по потоку d = 7 мм, высоту h = 155 мкм, длину 150 мм и располагалась на расстоянии x = 230 мм от передней кромки модели. Неоднородность пограничного слоя в виде стационарного продольного возмущения порождалась воздействием *N*-волны на переднюю кромку пластины, как показано на рис. 1. После измерений в неоднородном пограничном слое клейкая лента удалялась со стенки рабочей части аэродинамической трубы, а стенка полировалась. Затем выполнялись измерения в однородном пограничном слое.



*Рис. 1.* Схема экспериментов с введением контролируемых возмущений в неоднородный пограничный слой. На рисунке обозначено: 1 и 2 – падающие слабые ударные волны; 3 – генератор слабых ударных волн; 4 – источник контролируемых возмущений; 5 и 6 – относительное изменение массового расхода в сечениях x = -10 и x = 60 мм

*Fig. 1.* Experimental set up with the introduction of controlled disturbances into an inhomogeneous boundary layer. The figure shows: *1* and 2 – incident weak shock waves; 3 –weak shock waves generator; 4 – controlled disturbances source; 5 and 6 – relative mass flow change in sections x = -10 and x = 60 mm

Траектория движения датчика термоанемометра в пограничном слое и теоретическая толщина пограничного слоя  $\delta = 8, 7\sqrt{\frac{x}{\text{Re}_1}}$  на уровне ( $\rho U$ )<sub>0,99</sub> в зависимости от координаты *x* приведены на рис. 2.

Обработка результатов термоанемометрических измерений осуществлялась программой, написанной в среде графического программирования LabVIEW.

Степень неоднородности среднего течения оценивалась по характеру изменения нормированной величины среднего массового расхода  $\rho U$  вдоль трансверсальной координаты *z*. Количественно это изменение получается из данных измерения датчиком термоанемометра по пространству. Зависимость  $\rho U(z)$  определяется из уравнения, выражающего связь среднего напряжения на выходе термоанемометра с массовым расходом в сверхзвуковом потоке [12]:

$$E^2 = L + N \cdot (\rho U)^n$$

где L и N – размерные калибровочные коэффициенты для конкретного датчика.

С учетом n = 0,5, получим:  $\frac{\Delta(\rho U)}{(\rho U)} = 4 \frac{\Delta E}{E}$ .

Для данной постановки задачи процедура обработки экспериментальных данных допускает три различных варианта нормировки мгновенного значения пульсационного сигнала датчика термоанемометра: на локальные измеренные значение напряжения, среднее или медианное



*Рис. 2.* Положение датчика термоанемометра по  $y_1$  и толщина пограничного слоя б по величине ( $\rho U$ )<sub>0,99</sub> в зависимости от *x*.

*Fig. 2.* The position of hot-wire probe on  $y_1$  and boundary layer thickness  $\delta$  by value  $(\rho U)_{0.99}$  depending on x

значение [14]. В данной работе обработка данных осуществлялась с нормировкой на среднее значение напряжения. Для оценки волновых спектров интегрирование выполнялось по методу трапеций.

Частотно-волновые спектры контролируемых (периодических) возмущений определялись с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ) в виде:

$$\tilde{A}(x_k,\beta,f_l) = \frac{\sqrt{2}}{\delta_0 \cdot T \cdot Q} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} A(x_k,z_j,t_n) \cdot e^{-i(\beta \cdot z_j - \omega_l \cdot t_n)} \Delta z_j \Delta t ,$$

где  $\delta_0 \approx 1$  мм – масштаб толщины пограничного слоя для нормировки; *T* – длина реализации по времени;  $Q \approx 0,25$  – коэффициент чувствительности датчика термоанемометра к пульсаци-

ям массового расхода;  $A(x_k, z_j, t_n) = \frac{e'(x_k, z_j, t_n)}{E(x_k, z_j)}$  – мгновенная величина безразмерных пуль-

саций выходного сигнала термоанемометра;  $\Delta z_j = z_j - z_{j+1}$ ;  $\Delta t -$ шаг дискретизации по времени АЦП.

Использование ДПФ по времени вместо алгоритма быстрого преобразования Фурье вызвано необходимостью достижения высокой точности (не хуже  $\pm 0,1$  Гц) оценки гармоник контролируемых возмущений.

Амплитуда и фаза возмущений находились после ДПФ по формулам:

$$A_{f\beta}(x_k,\beta,f_l) = \left| \tilde{A}(x_k,\beta,f_l) \right|,$$

$$\Phi_{f\beta}(x_k,\beta,f_l) = \operatorname{arctg}\left( -\frac{Im[\tilde{A}(x_k,\beta,f_l)]}{Re[\tilde{A}(x_k,\beta,f_l)]} \right).$$

Спектральные амплитуды стационарных возмущений рассчитывались с помощью ДПФ по формуле:

$$A_{\beta}(x_i,\beta) = \left| \frac{1}{Z_0} \sum_{j=1}^M A(x_i, z_j) e^{-i(\beta z_j)} z \right|,$$

где  $Z_0$  – ширина области измерения и M – число измеренных точек, а  $\Delta z = z_i - z_{i+1}$ .

Процедура оценки амплитудно-волнового спектра проверена на данных с известными Фурье-образами.

Для отрисовки пространственно-временных изолиний гармоник использовалась реальная часть полученного Фурье-образа:

$$A_{f_k}(x_i, z_j, t_l) = \cos(2\pi f_k t_l) Re(\hat{A}(x_i, z_j, f_k))$$

Здесь  $t_l$  – временной ряд длиной от 0 до 200 мкс, количество точек в котором зависит от  $f_k$ .

### Результаты экспериментов и их анализ

Измерения падающей *N*-волны при x = -10 мм, приведенные на рис. 3, показывают, что в поток вводилась пара слабых ударных волн амплитудой ±3 %.



*Рис. 3.* Распределение нормированной величины среднего массового расхода по трансверсальной координате *z Fig. 3.* Distribution of the normalized value of the mean mass flow along the transversal coordinate *z*

Здесь величина ( $\rho U$ )<sub> $\infty$ </sub> определялась по показаниям измерительной системы T-325, а значение ( $\rho U$ ) – из термоанемометрических результатов.

Результаты измерений в однородном и неоднородном пограничном слое (ПС) модели по трансверсальной координате z приведены на рис. 4. В результате воздействия пары слабых ударных волн (в виде N-волны) на переднюю кромку плоской пластины в сверхзвуковом пограничном слое порождается продольное стационарное возмущение. Его характеризует распределение нормированного массового расхода по поперечной координате z, которое показано на рис. 4, б. Постановкой эксперимента предполагалось, что пространственный волновой пакет будет вводиться в продольный след, порожденный вторым фронтом N-волны (см. рис. 1). Координата z = 0 соответствует линии, на которой расположено отверстие источника контролируемых возмущений. Из рис. 4, б видно, что возмущение в пограничном слое имеет вид «перевернутой» *N*-волны. В области  $z \approx 2$  мм в распределении массового расхода имеется характерный максимум, который связан с воздействием фронта *N*-волны. Рассматривая начальное распределение при x = 60 мм, будем считать, что продольная неоднородность порождается *N*-волной в области –4 мм < z < 15 мм. Данная область характеризуется достаточно плавным изменением полного массового расхода от z = -2 до 12 мм. Резкий характер изменения массового расхода имеется хо-вого расхода имеется в областях от –4 до –1,5 мм и от 12 до 15 мм.



*Рис. 4.* Распределение нормированной величины среднего массового расхода по трансверсальной координате z: *a* – однородный ПС; *б* – неоднородный ПС

*Fig. 4.* Distribution of the mean mass flow rate normalized value along the transversal coordinate z: a – homogeneous BL; b – inhomogeneous BL

Представление о развитии волнового поезда во времени можно получить из пространственно-временных изолиний амплитуды гармоник в плоскости (z, t). Отметим, что согласно амплитудным спектрам осциллограмм, источник контролируемых возмущений вводил в пограничный слой гармоники k = 1, 2, 3, 4 при x = 60 мм, однако при x = 100 мм и более наблюдались только возмущения при k = 2, 3, 4. Ниже приводятся данные только для второй гармоники. Результаты для более высокочастотных возмущений не позволяют оценить их волновые характеристики из-за их малой амплитуды.

На рис. 5–8 изображены изолинии амплитуды возмущений во времени в однородном (*a*) и неоднородном (*б*) пограничном слое, полученные в сечениях x = 60, 100, 110 и 120 мм для частоты f = 20 кГц.



*Рис. 5.* Изолинии амплитуды возмущений для частоты 20 кГц в поперечном направлении во времени при *x* = 60 мм: *a* – однородный ПС; *б* – неоднородный ПС

*Fig.* 5. Isolines of the disturbances amplitude for a frequency of 20 kHz in the transverse direction in time at x = 60 mm: a – homogeneous BL; b – inhomogeneous BL

ISSN 2541-9447 Сибирский физический журнал. 2024. Том 19, № 2 Siberian Journal of Physics, 2024, vol. 19, no. 2



*Puc. 6.* Изолинии амплитуды возмущений для частоты 20 кГц в поперечном направлении во времени при x = 100 мм: a – однородный ПС; б – неоднородный ПС
 *Fig. 6.* Isolines of the disturbances amplitude for a frequency of 20 kHz in the transverse direction in time at x = 100 mm: a – homogeneous BL; b – inhomogeneous BL



Рис. 7. Изолинии амплитуды возмущений для частоты 20 кГц в поперечном направлении во времени при x = 110 мм: *a* – однородный ПС; *б* – неоднородный ПС

*Fig.* 7. Isolines of the disturbances amplitude for a frequency of 20 kHz in the transverse direction in time at x = 100 mm: a – homogeneous BL; b – inhomogeneous BL



*Рис.* 8. Изолинии амплитуды возмущений для частоты 20 кГц в поперечном направлении во времени при x = 120 мм: a – однородный ПС;  $\delta$  – неоднородный ПС *Fig.* 8. Isolines of the disturbances amplitude for a frequency of 20 kHz in the transverse direction in time at x = 120 mm: a – homogeneous BL; b – inhomogeneous BL

Результаты рис. 6, б свидетельствуют о начале взаимодействия контролируемых пульсаций по сценарию наклонного перехода. Формирование пакета стоячих волн в центре волнового поезда характерно для наклонного механизма взаимодействия и обнаруживается в данных, представленных на рис. 6,  $\delta$  в центральной области от 0 до z = +4 мм. Имеющаяся неоднородность течения несколько ускоряет данный механизм взаимодействия возмущений в сравнении с однородным течением, в котором этот процесс заметен только при x = 120 мм (см. данные на рис. 8, a). Однако реальное положение начала наклонного режима взаимодействия пульсаций можно будет уточнить из данных по волновым спектрам амплитуды. Как видно из изолиний амплитуды на рис. 5-8, волновой поезд в неоднородном и однородном пограничном слое практически симметричен относительно z = 0. Наблюдается искажение картины изолиний возмущений только при x = 110 мм, что, возможно, связано с воздействием твердых частиц на датчик термоанемометра во время проведения измерений. Эти результаты сильно отличаются от данных работы [12], в которой число Маха было равно 2, а волновой поезд порождался с противоположной стороны поперечной неоднородности. Отметим, что в [12] при x = 100 мм в неоднородном течении наблюдался только рост возмущений субгармонической частоты, а субгармонический резонанс не был сформирован. В данной работе субгармонический резонанс не наблюдается совсем. Возможно, данный факт является свидетельством в пользу разного влияния продольного возмущения, порожденного *N*-волной, на ЛТП в сверхзвуковом пограничном слое. Отметим, что в [15] численно получено, что стационарное возмущение, генерируемое 1-м (см. рис. 1) фронтом *N*-волны, приводит к смещению начала ламинарно-турбулентного перехода вверх по потоку, в то время как возмущение от 2-го фронта *N*-волны на положение начала перехода влияния не оказывает.

Далее рассматриваются оценки волновых спектров и дисперсионных зависимостей контролируемых возмущений. На рис. 9–12 изображены амплитудные (*a*) и фазовые (*б*) спектры по поперечному волновому числу  $\beta$  волнового пакета для частоты f = 20 кГц в сечениях x = 60, 100, 110 и 120 мм для однородного и неоднородного течения.

Из графиков на рис. 10–12, *а* видно, что максимальная спектральная амплитуда контролируемых возмущений в целом возрастает вниз по потоку как в однородном, так и неоднородном течении. Для однородного пограничного слоя при x = 100 мм она примерно в 3 раза превышает значения, полученные при x = 60 мм, однако при x = 110 и 120 мм величина амплитуды уменьшается. Для неоднородного пограничного слоя при x = 110 мм она только в 2,3 раза превышает значения, полученные при x = 60 мм.



*Рис.* 9. Амплитудные (a) и фазовые (б) спектры по β волнового поезда для частоты f = 20 кГц в сечении x = 60 мм для однородного и неоднородного ПС
 *Fig.* 9. Amplitude (a) and phase (b) spectra of wave train on β for frequency f = 20 kHz in cross section x = 60 mm for homogeneous and inhomogeneous BL







*Рис. 11.* Амплитудные (*a*) и фазовые (б) спектры по  $\beta$  волнового поезда для частоты f = 20 кГц в сечении x = 110 мм для однородного и неоднородного ПС





*Puc. 12.* Амплитудные (*a*) и фазовые ( $\delta$ ) спектры по  $\beta$  волнового поезда для частоты f = 20 кГц в сечении x = 120 мм для однородного и неоднородного ПС *Fig. 12.* Amplitude (*a*) and phase (*b*) spectra of wave train on  $\beta$  for frequency f = 20 kHz in cross section x = 120 mm for homogeneous and inhomogeneous BL

ISSN 2541-9447 Сибирский физический журнал. 2024. Том 19, № 2 Siberian Journal of Physics, 2024, vol. 19, no. 2 Установлено, что наиболее растущими являются волны с  $\beta \approx \pm 0.8$  рад/мм в обоих случаях. Фазовые спектры (рис. 11, б и 12, б) при некоторых  $\beta$  имеют участки практически постоянных значений фазы при  $\beta$  от  $\pm 1$  до  $\pm 3$  рад/мм. Это означает, что волны с этими волновыми числами  $\beta$  локализованы в центре волнового пакета и усиливаются именно там.

Неоднородность течения в пограничном слое является затрудняющим фактором при анализе результатов с точки зрения волнового подхода. Однако в работе сделаны оценки продольного волнового числа  $\alpha_r$ . Для этого построены зависимости фазы возмущений от координаты x для частоты 20 кГц с различными поперечными волновыми числами  $\beta$ . Поскольку нарастание фазы вниз по потоку рассматривается как линейное, то получалось рассмотреть до 3-х ее значений по x. Для оценки волновых характеристик возмущений частотой 20 кГц использовались фазовые спектры, представленные на рис. 10–12,  $\delta$ . При помощи линейной аппроксимации для пар значений x (100, 120 мм), (100, 110 мм) и (110, 120 мм) вычислены значения продольного волнового числа:  $\alpha_r = \frac{\Delta \Phi_{f\beta}}{\Delta x}$ . Затем рассчитывалось средние значения  $\alpha_r$ , приведенные на рис. 13 в виде зависимости продольного волнового числа  $\beta$  волнового

на рис. 13 в виде зависимости продольного волнового числа  $\alpha_r$  от волнового числа  $\beta$  волнового вектора в трансверсальном направлении для однородного (*a*) и неоднородного (*б*) пограничного слоя.



*Рис. 13*. Волновые характеристики для частоты f = 20 кГц: зависимость продольного волнового числа  $\alpha_r$  от волнового числа  $\beta$  волнового вектора в трансверсальном направлении: a -однородный ПС;  $\delta$  – неоднородный ПС

*Fig. 13.* Wave characteristics for frequency f = 20 kHz: dependence of the longitudinal wave number  $\alpha_r$  on the wave number  $\beta$  of the wave vector in the transversal direction: a - homogeneous BL; b - inhomogeneous BL

Исходя из полученных данных, возможно сделать оценки углов наклона и фазовой скорости возмущений. Описанный выше подход хорошо зарекомендовал себя в случае однородного пограничного слоя [13]. Тем не менее в данной работе, несмотря на сложности, связанные с неоднородностью течения, удалось применить волновой подход и предложить условия синхронизма для механизма наклонного перехода, которые приведены в табл. 1 и 2. Первый триплет для механизма наклонного перехода

Table 1

Таблица 1

The first triplet for the oblique breakdown mechanism

п	<i>f</i> , кГц	β, рад/ мм	α <sub>r</sub> , рад/ мм	χ, °
1	20	-0,7	0,39	-60,9
2	20	-1,5	0,34	-77,2
3	0	0,8	0,05	86,4

Таблица 2

Второй триплет для механизма наклонного перехода

Table 2

The second triplet for the oblique breakdown mechanism

п	<i>f</i> , кГц	β, рад/ мм	α <sub>r</sub> , рад/ мм	χ, °
1	20	0,7	0,39	60,9
2	20	1,5	0,34	77,2
3	0	-0,8	0,05	-86,4

Выявлены типичные резонансные триплеты волн. На рис. 14, *a*, *б* представлены волновые спектры стационарного возмущения и основной гармоники при x = 120 мм. Стрелками на рис. 14 указаны задействованные пики. Для построения триплетов (рис. 15, *a*, *б*) использовались данные из табл. 1 и 2 соответственно.



*Рис. 14.* Волновые спектры стационарного возмущения и основной гармоники при x = 120 мм с указанием пиков: a - для первого триплета;  $\delta - для$  второго *Fig. 14.* Wave spectra of stationary disturbance and fundamental harmonic at x = 120 mm, indicating peaks (*a*) for the first triplet; (*b*) for the second



Рис. 15. Предполагаемый триплет для взаимодействия основной волны и стационарного возмущения по данным из табл. 1 (а) и 2 (б)



Полученные результаты позволили зафиксировать механизм наклонного перехода в волновом поезде в условиях неоднородности течения. В соответствии с ними предлагается оценка волнового числа для стационарного возмущения по величине координаты *x*, в которой выпол-

нены измерения:  $\alpha_r = \frac{2\pi}{x}$ .

### Заключение

Проведено экспериментальное исследование механизмов взаимодействия волн в пограничном слое на плоской пластине при числе Maxa 2,5, течение в котором искажено продольным возмущением, порожденным на острой передней кромке парой слабых ударных волн.

По условиям экспериментов, единичное число Рейнольдса было  $Re_1 = \frac{U}{U} = (8,0 \pm 0,1) \times 10^6 \text{ m}^{-1}$ .

Выбор этого значения связан с уменьшенным уровнем шума в рабочей части T-325. В работе представлены результаты для возмущений частотой 20 кГц. Возмущения частотой 10 кГц обнаруживались в обоих случаях только при x = 60 мм. Поэтому субгармонический резонанс не наблюдался в представленных экспериментах.

Выполнен анализ пространственно-временных распределений и частотно-волновых спектров пульсаций, а также их волновых характеристик в линейной и слабонелинейной фазе развития волнового поезда в однородном и неоднородном пограничном слое при фиксированной мощности источника контролируемых возмущений.

Разложение по волновому спектру стационарной неоднородности и экспериментальные данные о волновых характеристиках и спектрах возмущений позволили предложить варианты взаимодействия волн для режима наклонного перехода.

## Список литературы

- 1. Ваганов А. В., Ермолаев Ю. Г., Колосов Г. Л., Косинов А. Д., Панина А. В., Семенов Н. В., Яцких А. А. К воздействию падающей волны Маха на сверхзвуковой пограничный слой // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23, № 1. С. 45–50.
- 2. Егоров И. В., Зыонг Н. Х., Нгуен Н. К., Пальчековская Н. В. Численное моделирование влияния волны Маха на ламинарно-турбулентный переход в сверхзвуковом пограничном слое // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2022. Т. 504, № 1. С. 36–40.
- Питеримова М. В., Косинов А. Д., Семёнов Н. В., Яцких А. А., Кочарин В. Л., Ермолаев Ю. Г. Экспериментальное исследование влияния пары слабых ударных волн на ламинарно-турбулентный переход в пограничном слое плоской пластины при числе Маха 2 //

Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 2. С. 30–40. DOI: 10.25205/2541-9447-2022-17-2-30-40.

- 4. Бойко А. В., Грек Г. Р., Довгаль А. В., Козлов В. В. Возникновение турбулентности в пристенных течениях. Новосибирск: Наука, 1999. 327 с.
- 5. Matsubara M. and Alfredsson P. H. Disturbance growth in boundary layers subjected to free stream turbulence // J. Fluid Mech. 2001. Vol. 430. P. 149.
- Fransson J. H. M., Brandt L., Talamelli A. and Cossu C. Experimental and theoretical investigation of the nonmodal growth of steady streaks in a flat plate boundary layer // Physics of Fluids. 2004. Vol. 16. P. 36–27.
- Fransson J. H. M., Talamelli A., Brandt L., Cossu C. Delaying transition to turbulence by a passive mechanism // Physical Review Letters, American Physical Society. 2006. Vol. 96 (6). P. 064501. 10.1103/physrevlett.96.064501.
- 8. Грек Г. Р., Катасонов М. М., Козлов В. В. Моделирование полосчатых структур и возникновения турбулентного пятна в пограничном слое крыла при повышенной степени турбулентности набегающего потока // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, № 4. С. 585–598.
- 9. Гапонов С. А., Маслов А. А. Развитие возмущений в сжимаемых потоках. Новосибирск: Наука, 1980. 144 с.
- 10. Качанов Ю. С., Козлов В. В., Левченко В. Я. Возникновение турбулентности в пограничном слое. Новосибирск: Наука, 1982. 151 с.
- Косинов А. Д., Семенов Н. В., Питеримова М. В., Яцких А. А., Ермолаев Ю. Г., Смородский Б. В., Шмакова А. В. Особенности развития волнового поезда в продольном возмущении сверхзвукового пограничного слоя // Прикладная механика и техническая физика. 2023. Online first. DOI: 10.15372/PMTF202315394.
- 12. Косинов А. Д., Питеримова М. В., Шмакова А. В., Семенов Н. В., Ермолаев Ю. Г. Экспериментальное исследование эволюции контролируемых возмущений в продольном вихре, порожденном в пограничном слое плоской пластины при числе Маха 2 // Прикладная механика и техническая физика. 2023. Т. 64, №4. С. 118–129. DOI: 10.15372/PMTF202215232
- Kosinov A. D., Semionov N. V., Shevel'kov S. G., Zinin O. I. (1994). Experiments on the Nonlinear Instability of Supersonic Boundary Layers // Lin S. P., Phillips W. R. C., Valentine D. T. (Eds) Nonlinear Instability of Nonparallel Flows. International Union of Theoretical and Applied Mechanics. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-85084-4 17
- Piterimova M. V., Kosinov A. D., Panina A. V., Semionov N. V., Ermolaev Yu. G., Yatskikh A. A. The controlled periodic impact on the longitudinal vortex in the boundary layer at Mach 2 // Journal of Physics: Conference Series: XVI All-Russian Seminar with international participation "Dynamics of Multiphase Media" (Novosibirsk, 30 Sept. – 5 Oct. 2019). Vol. 1404. S. 1.: IOP Publishing, 2019. 012094(6) p. DOI: 10.1088/17426596/1404/1/012094
- 15. Din Q. H., Egorov I. V., Fedorov A. V. Mach wave effect on laminar-turbulent transition in supersonic flow over a flat plate // Fluid Dynamics. 2018. Vol. 53, № 5. P. 690–701.

# References

- Vaganov A. V., Ermolaev Yu. G., Kolosov G. L., Kosinov A. D., Panina A. V., Semionov N. V. and Yatskikh A. A. Impact of incident Mach Wave on Supersonic Boundary Layer. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2016, 23 (1): 45–50
- 2. Egorov I. V., Duong N. H., Nguyen N. C. and Palchekovskaya N. V. Numerical Simulation of the Influence of a Mach Wave on the Laminar-Turbulent Transition in a Supersonic Boundary Layer. *Doklady Rossiiskoi Akademii Nauk*. Fizika, Tekhnicheskie Nauki 2022, 504(1): 36–40
- Piterimova M. V., Kosinov A. D., Semionov N. V., Yatskikh A. A., Kocharin V. L., Yermolaev Yu. G. Experimental study of effect of a pair of weak shock waves on laminarturbulent transition in the boundary layer of flat plate at Mach number 2. *Siberian Journal of Physics*. 2022; 17(2):30-40. (In Russ.) https://doi.org/10.25205/2541-9447-2022-17-2-30-40
- 4. **Boiko A. V., Grek G. R., Dovgal A. V., and Kozlov V. V.** The Origin of Turbulence in Near-Wall Flows. Springer-Verlag, Berlin, 2002.
- 5. Matsubara M. and Alfredsson P. H. Disturbance growth in boundary layers subjected to free stream turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*. 2001, 430: 149
- 6. Fransson J. H. M., Brandt L., Talamelli A. and Cossu C. Experimental and theoretical investigation of the nonmodal growth of steady streaks in a flat plate boundary layer. *Physics of Fluids*. 2004, 16: 3627.
- 7. Fransson J. H. M., Talamelli A., Brandt L., Cossu Carlo. Delaying transition to turbulence by a passive mechanism. *Physical Review Letters, American Physical Society*, 2006, 96 (6): 064501.
- 8. Grek G. R., Katasonov M. M. & Kozlov V. V. Modelling of streaky structures and turbulentspot generation process in wing boundary layer at high free-stream turbulence. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2009, 15 (4): 549–561
- 9. Gaponov S. A. and Maslov A. A. Development of Disturbances in Compressible Flows. 1980, Nauka, Novosibirsk, 144 p. (In Russ)
- 10. Kachanov Yu.S., Kozlov V.V., Levchenko V.Ya. The turbulence origin in the boundary layer. 1982, Nauka, Novosibirsk, 151 p. (In Russ)
- Kosinov A. D., Semionov N. V., Piterimova M. V., Yatskikh A. A., Yermolaev Yu. G., Smorodsky B. V., Shmakova A. V. Features of the wave train development in a longitudinal disturbance of a supersonic boundary layer. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2023. ONLINE FIRST. DOI: 10.15372/PMTF202315394.
- 12. Kosinov A. D., Piterimova M. V., Shmakova A. V., Semionov N. V., Ermolaev Yu. G. Experimental study of evolution of controlled perturbations in a longitudinal vortex generated in a boundary layer on a flat plate at a Mach number M = 2. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2023, 64(4): 656-666.
- Kosinov A. D., Semionov N. V., Shevel'kov S. G., Zinin O. I. Experiments on the Nonlinear Instability of Supersonic Boundary Layers. 1994, In: *Lin, S.P., Phillips, W.R.C., Valentine, D.T.* (eds) Nonlinear Instability of Nonparallel Flows. International Union of Theoretical and Applied Mechanics. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-85084-4\_17
- Piterimova M. V., Kosinov A. D., Panina A. V., Semionov N. V., Ermolaev Yu. G., Yatskikh A. A. The controlled periodic impact on the longitudinal vortex in the boundary layer at Mach 2. *Journal of Physics: Conference Series: XVI All-Russian Seminar with international participation "Dynamics of Multiphase Media" (Novosibirsk, 30 Sept. – 5 Oct. 2019). Vol. 1404. S.I.: IOP Publishing, 2019. 012094(6).* DOI: 10.1088/17426596/1404/1/012094
- 15. Din Q. H., Egorov I. V., Fedorov A. V. Mach wave effect on laminar-turbulent transition in supersonic flow over a flat plate. *Fluid Dynamics*. 2018, 53(5): 690–701.

## Сведения об авторах

Питеримова Марина Валадимировна, младший научный сотрудник

Косинов Александр Дмитриевич, доктор физико-математических наук

Семёнов Николай Васильевич, доктор физико-математических наук

Яцких Алексей Анатольевич, кандидат физико-математических наук

Шмакова Александра Валерьевна, кандидат физико-математических наук

**Ермолаев Юрий Геннадьевич**, кандидат физико-математических наук Смородский Борис Владимирович, кандидат физико-математических наук

# Information about the Authors

Marina V. Piterimova, Junior Researcher Alexander D. Kosinov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences Nikolay V. Semionov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences Aleksey A. Yatskikh, Candidate of Physical and Mathematical Sciences Alexandra V. Shmakova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences Yuri G. Yermolaev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences Boris V. Smorodsky, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

> Статья поступила в редакцию 28.02.2023; одобрена после рецензирования 05.12.2023;принята к публикации 12.03.2024

*The article was submitted 28.02.2023; approved after reviewing 05.12.2023; accepted for publication 12.03.2024*  Научная статья

УДК 681,787;517,443;519,6 DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-111-118

# Преобразование Фурье на практикуме по физической оптике в Новосибирском государственном университете

### Спартак Евгеньевич Краснопевцев

Новосибирский государственный университет Новосибирск, Россия

k.s.e@nsu.ru

#### Аннотация

Описана разработка программы на языке Python для анализа изображений интерференций и формирования графика спектра источника света для практикума по физической оптике. Предусмотрена калибровка преобразования Фурье и определение частотных составляющих в составе света. Строится график видности, оценивается ширина видности.

#### Ключевые слова

интерференция, преобразование Фурье, спектральный состав света, видность, длина когерентности

#### Для цитирования

*Краснопевцев С. Е.* Преобразование Фурье на практикуме по физической оптике в Новосибирском государственном университете // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 2. С. 111–118. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-111-118

# Fourier Transform at the Workshop on Physical Optics of NSU

### Spartak E. Krasnopevtsev

Novosibirsk State University Novosibirsk, Russian Federation

k.s.e@nsu.ru

#### Annotation

Description of the development of a program in Python for analyzing interference images and generating a graph of the spectrum of a light source for a workshop on physical optics. Calibration of the Fourier transform and determination of frequency components in the composition of light are provided. A visibility graph is constructed and the visibility width is estimated.

Keywords

Interference, Fourier transform, spectral composition of light, visibility, coherence length

#### For citation

Krasnopevtsev S. E. Fourier transform at the workshop on physical optics of NSU. Siberian Journal of Physics, 2024, vol. 19, no. 2, pp. 111–118 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-111-118

© Краснопевцев С. Е., 2024

#### Введение

В структуре учебного процесса физического факультета Новосибирского государственного университета (НГУ) преобладает теоретическая форма обучения над практической формой. Поэтому занятия на лабораторных практикумах являются своего рода противовесом, развивающим у студентов необходимые навыки практической работы и лабораторных исследований.

Современные физические исследования представляют собой не только работу с научными приборами и экспериментальным оборудованием, но и автоматизацию эксперимента, цифровую обработку данных, анализ и представление информации. Следовательно, эту цифровую, информационную специфику необходимо так же учитывать и внедрять ее в организацию учебного процесса лабораторных практикумов.

#### 1. Постановка задачи

На практикуме по физической оптике для студентов второго курса физического факультета НГУ возникла необходимость разработки программы анализа изображения интерференционных картин, которая позволила бы получить спектральный состав источника света.

На практикуме имеется оптическая лабораторная установка для изучения интерференции света, которая предусматривает получение интерференционной картины тремя способами. Первый способ реализует опыт Юнга с интерференцией от двух щелей. Второй использует бипризму Френеля, где пересекаются пучки, преломленные на двух плечах этой призмы. Третий реализует интерферометр Майкельсона, где два пучка, полученные на светоделительном кубе, отразившись от двух зеркал, вновь сходятся после того же светоделительного куба, пересекаясь под небольшим углом. В результате формируются три типа интерференционных картин, которые фиксируются видеокамерой, передающей изображение на компьютер, где его можно сохранить в файл.

Целью лабораторной работы является ознакомление с интерференцией света и определение длины волны нескольких источников света, которые подаются для формирования интерференционных картин. Один из трех источников света имеет известную длину волны.

Оптическая схема установки позволяет смешивать пучки всех трех источников в один пучок. Эти источники включаются в любых комбинациях тремя переключателями.

#### 2. Реализация программы

Программа реализована на языке Python, который обретает необычайную популярность в научной среде. Язык развивается сообществом энтузиастов, имеет открытый исходный код и распространяется бесплатно. Язык легок в освоении и прост в использовании, обладает высокой гибкостью и элегантностью. Сравнение Python с популярными языками типа C++, показывает, что Python в разы повышает производительность труда программиста. Число символов в типичной программе на Python составляет около 20–35 % от программного кода на языке C++ или Java для аналогичной программы. А это и сокращенное в 3–5 раз время на отладку программы.

Популярность языка Python связана с тем, что для него существует большое количество свободно распространяемых и легко устанавливаемых программных библиотек, позволяющих существенно расширить возможности программ. Язык Python является одним из двух языков, предлагаемых для изучения студентам второго курса физического факультета НГУ по дисциплине «Программирование».

Программа реализована на основе библиотеки пользовательского интерфейса PySide6, имеющую открытую лицензию. Кроме этого, для получения спектра необходимы свободно распространяемые программные модули: numpy, scipy, cv2 и PyQtGraph. Модуль numpy предоставляет набор функций для работы с массивами (в терминах языка Python они называют-

ся списками). Модуль scipy предоставляет набор математических функций, в том числе связанных с преобразованием Фурье. Модуль сv2 представляет собой набор классов библиотеки OpenCV версии 2.0, которая содержит набор функций для работы с изображениями. Модуль PyQtGraph используется для вывода изображений на экран.

Ниже (рис. 1) приводится фрагмент программы, отвечающий за получение массивов, необходимых для отображения спектра в виде графика на экране. Символ решетки «#» обозначает начало комментария. Комментарии не выполняются и служат лишь для добавления пояснений.

```
amplitude_data = [] # Массив значений профиля интенсивности (амплитуды) интерференционной
                 # картины, полученный ранее. Он должен быть заполнен данными амплитуды.
wavelength = True
                   # Логическая переменная, определяющая форму представления спектра
ColorSpectrNM = QColor(255,235,0) # Цвет линии (в формате RGB) графика спектра в длинах волн
ColorSpectrTHz = QColor(0,235,255) # Цвет линии (в формате RGB) графика спектра в частотах
# Производим дискретное преобразование Фурье
yf = scipy.fft.rfft(amplitude_data)
# Производим сдвиг компонент нулевой частоты в центр спектра
y = scipy.fft.fftshift(yf)
# Получим массив (шкалу) частот дискретного преобразования Фурье
time step = 1/n # где n - параметр, определяющий масштабирование спектра (для его калибровки)
x = scipy.fft.fftfreq( yf.size, time step )
# Сократить полученный массив спектра вдвое, т.к. это две симметричные кривые,
# относительно нулевой частоты
half_n = math.trunc( y.size / 2 ) # Получим размер половины размера массива с
                                    округлением до меньшего целого значения
# Получим новый массив значений нижней оси в длинах волн (нм) вместо частот (ТГц)
xl = 300000 * np.reciprocal(x, where= x!=0) # Взять обратное значение всех элементов массива
# Подготовим массивы вещественных значений х и у из их комплексных значений
gxf = np.abs(x[1:half_n])
                                      # Массив значений оси (шкалы) Х для спектра частот
gxl = np.abs(xl[1:half_n])
                                       # Массив значений оси (шкалы) Х для спектра длин волн
gy = np.abs(y[half_n+1:half_n+half_n]) # Массив значений высот спектра
# Подготовка объекта графического поля для отображения спектра
gwin = pg.GraphicsLayoutWidget() # Создаем объект класса библиотеки PyQtGraphics
p3 = gwin.addPlot(title="Спектр") # Создает объект класса PlotItem (линия графика спектра)
d3 = p3.plot(enableMouse=False) # Получаем объект класса ViewBox
# Вывод графика спектра (в зависимости от режима представления, в длинах волн или в частотах)
if wavelength == True: # Если режим представления спектра в нанометрах
    d3.setData( gxl, gy, pen=ColorSpectrNM ) # Отображение графика спектра
else:
                       # Если режим представления спектра в терагерцах
   d3.setData( gxf, gy, pen=ColorSpectrTHz ) # Отображение графика спектра
```

Рис. 1. Выдержка из программы, реализующая преобразования Фурье и выводящая результат в объект изображения

Fig. 1. Excerpt from a program that implements the Fourier transform and outputs the result to an image object

Пользовательский интерфейс программы построен в виде последовательно следующих друг за другом горизонтальных графических элементов (окон), в которых отображаются графики по мере обработки и преобразования исходных данных (рис. 2). Таких окон три:

– окно исходного изображения;

- окно поперечного профиля интенсивности интерференционной картины;

- окно спектрального представления.

Границы между всеми окнами перемещаются при помощи манипулятора «мышь» (далее – мышь). Это позволяет заострить внимание на любом интересующем изображении, увеличив его на весь размер окна программы.



*Puc. 2.* Общий вид окна программы *Fig. 2.* General view of the program window

Окно исходного изображения представляет исследуемое изображение. Поверх него отображается рамка. Это инструмент выборки интересующего фрагмента изображения. В терминах программы этот инструмент именуется «областью интереса». Его можно перемещать по изображению, изменять отдельно ширину и высоту. Если ширина определяет длину строки данных для последующего анализа, то высота определяет границы усреднения строк данных изображения. По мере эксплуатации программы стало ясно, что не все исследуемые изображения интерференционных картин имеют полосы, строго выровненные по вертикали. А если это так, то усреднение таких наборов строк с косыми полосами приводит к размытию и снижению видности (контраста по Майкельсону) итогового профиля интенсивности интерференционных полос. Поэтому добавлена возможность изменения угла поворота области интереса. При этом выборка строк данных и их усреднение так же производится под заданным углом. Само изображение интерференционной картины также можно перемещать и масштабировать мышью, синхронно с областью интереса. Это позволяет более тщательно рассмотреть детали изображения и точнее задать форму и положение рамки области интереса.

Окно поперечного профиля интенсивности интерференционной картины (рис. 3) позволяет студенту осмыслить, какую информацию мы извлекаем из изображения для дальнейшего получения из него спектральной характеристики источника света. По виду этого графика замечено, что наклон интерференционных полос влияет на амплитуду изменения профиля интенсивности.



*Puc. 3.* Кривая профиля интенсивности (зеленая линия) и кривая видности (черная линия) *Fig. 3.* Intensity profile curve (green line) and visibility curve (black line)

Учитывая важность точной подгонки угла поворота области интереса, добавлен новый элемент – график величины видности по всей длине выбранных данных. По наибольшей высоте его вершины можно численно определить пик видности и, соответственно, оптимальный угол поворота области интереса. Для светодиодных одноцветных источников света этот график имеет форму, похожую на «колокол» с выраженным максимумом max. Точки пересечения графика с уровнем max/*e* принято определять как границы видности. Для лазерных источников этот график представляет слегка искривленную прямую по всей протяженности графика. Это говорит о том, что длина когерентности источников этих типов существенно различается. По ширине границ видности можно оценить длину когерентности источника света. Это еще одна характеристика источника, определяемая представленной программой, которую можно получить в данной лабораторной работе. Определение видности производится по классической формуле:

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

где  $I_{\min}$  и  $I_{\max}$  – значения локальных экстремумов на графике профиля интенсивности интерференционных полос.

Для визуализации ширины области контраста добавлены две подвижные вертикальные риски, находящиеся в точках пересечения кривой видности с уровнем, равным max/*e*, где max – уровень максимальной высоты кривой видности, а *e* – основание натурального логарифма.

Завершающим элементом анализа является преобразование Фурье, исходными данными для которого является профиль интенсивности интерференционной картины. В результате дискретного преобразования Фурье мы получаем данные, на основании которого строится соответствующий график.

Кроме этого, в некоторых случаях удобно ограничить отображение спектра границами видимого диапазона. Для этого на панели инструментов и в меню программы имеются соответствующие опции.

#### 3. Калибровка и определение частот

Чтобы по полученному спектру можно было определить частоты его компонент, необходимо произвести калибровку. Для этого необходимо снять изображение интерференционной картины, полученной от одного источника монохроматического света известной длины волны. Загрузив это изображение и получив график спектра, мы увидим на нем одиночный пик. Далее необходимо включить режим калибровки. На графике спектра появится яркая риска с текстовой меткой, отображающей текущую длину волны в данной точке графика, а на панели инструментов станут доступны два регулятора (спин-бокса). Один из них позволяет задать длину волны используемого источника света. Во время подстройки этой величины риска на графике спектра будет перемещаться. Второй регулятор позволяет перемещать график спектра вправо или влево. Нужно переместить график спектра таким образом, чтобы точно совместить вершину спектрального пика с риской калибровочной длины волны (рис. 4).



*Puc. 4.* Завершение калибровки *Fig. 4.* Completing calibration

После завершения калибровки мы можем определять частоту или длину волны любого элемента спектра, просто перемещая курсор мыши по окну спектра. Риска, сопровождающая курсор мыши над областью спектра, снабжена числовой меткой, отображающей длину волны или частоту в зависимости от режима отображения спектра.



*Puc. 5.* Определение частот спектральных пиков *Fig. 5.* Determination of spectral peak frequencies

Если теперь загрузить в программу изображение интерференционной картины, полученной от других источников света или их комбинации, мы сможем определить частоты этих источников и даже оценить их относительную интенсивность. Для этого необходимо перемещать курсор мыши над окном отображения спектра. Вслед за курсором будет перемещаться риска с подписью, указывающей значение текущей длины волны в данной точке спектра (рис. 5).

Во время исследований важно сохранять единые условия снятия интерференционных картин при подготовке новых изображений интерференции.

Программа позволяет подключать современные камеры высокого разрешения, чтобы исследовать интерференционное изображение в реальном времени. Для получения ответов на возникающие вопросы предусмотрена подробная справка с иллюстрациями, доступная в меню и по нажатию клавиши «F1».

#### 4. Выволы

Представленная программа отличается от существующих программ прежде всего простотой управления, легким получением результатов и отсутствием лишнего. Она не имеет сложных и невостребованных в учебном процессе функций, которые свойственны профессиональным программам.



Рис. 6. Определение диаметра интерференционных колец Fig. 6. Determining the diameter of interference rings

ISSN 2541-9447 Сибирский физический журнал. 2024. Том 19, № 2 Siberian Journal of Physics, 2024, vol. 19, no. 2 В программу включены дополнительные инструменты, позволяющие использовать ее и в других работах для экранных измерений, например, шага полос, диаметров колец и т. п. (рис. 6).

## Сведения об авторе

Краснопевцев Спартак Евгеньевич, старший преподаватель

# Information about the Author

Spartak E. Krasnopevtsev, Senior Lecturer

Статья поступила в редакцию 31.01.2024; одобрена после рецензирования 07.02.2024; принята к публикации 17.02.2024 The article was submitted 31.01.2024; approved after reviewing 07.02.2024; accepted for publication 17.02.2024 «Сибирский физический журнал» публикует обзорные, оригинальные и дискуссионные статьи, посвященные научным исследованиям и методике преподавания физики в различных разделах науки, соответствующих направлениям подготовки на кафедрах физического факультета НГУ. Журнал издается на русском языке, однако возможна публикация статей иностранных авторов на английском языке.

1. Очередность публикации статей определяется их готовностью к печати. Рукописи, оформленные без соблюдения правил, к рассмотрению не принимаются.

Вне очереди печатаются краткие сообщения (не более четырех журнальных страниц), требующие срочной публикации и содержащие принципиально новые результаты научных исследований, проводимых в рамках тематики журнала.

Рекламные материалы публикуются при наличии гарантии оплаты, устанавливаемой по соглашению сторон.

2. В журнале печатаются результаты, ранее не опубликованные и не предназначенные к одновременной публикации в других изданиях. Публикация не должна нарушить авторского права других лиц или организаций.

Направляя свою рукопись в редакцию, авторы автоматически передают учредителям и редколлегии права на издание данной статьи на русском или английском языке и на ее распространение в России и за рубежом. При этом за авторами сохраняются все права как собственников данной рукописи. В частности, согласно международным соглашениям о передаче авторских прав за авторами остается право копировать опубликованную статью или ее часть для их собственного использования и распространения внутри учреждений, сотрудниками которых они являются. Копии, сделанные с соблюдением этих условий, должны сохранять знак авторского права, который появился в оригинальной опубликованной работе. Кроме того, авторы имеют право повторно использовать весь этот материал целиком или частично в компиляциях своих собственных работ или в учебниках, авторами которых они являются. В этих случаях достаточно включить полную ссылку на первоначально опубликованную статью.

3. Направлять рукописи в редакцию авторам рекомендуется по электронной почте либо приносить в редакцию электронную версию (в форматах MS WORD – \*.doc, или \*.docx, или \*.rtf) на диске или флэш-памяти. Такая отправка исходных материалов значительно ускоряет процесс рецензирования.

Авторам предлагается посылать свои сообщения в наиболее сжатой форме, совместимой с ясностью изложения, в совершенно обработанном и окончательном виде, предпочтительно без формул и выкладок промежуточного характера и громоздких математических выражений. Не следует повторять в подписях к рисункам пояснений, уже содержащихся в тексте рукописи, а также представлять одни и те же результаты и в виде таблиц, и в виде графиков.

Рекомендованный объем присылаемых материалов: обзорные статьи – до 25-ти страниц, оригинальные материалы – до 12-ти страниц, краткие сообщения – до 4-х страниц. В любом случае объем рукописи должен быть логически оправданным.

Не рекомендуется предоставление электронных копий рукописей в формате LATEX. По техническим условиям издательства в этом случае рукопись будет преобразована редакцией в формат MS WORD, что может привести к значительному увеличению времени обработки рукописи и искажениям авторского текста.

Сокращений слов, кроме стандартных, применять нельзя. Все страницы рукописи должны быть пронумерованы.

4. При отправке файлов по электронной почте просим придерживаться следующих правил:

- указывать в поле subject (тема) название, номер журнала и фамилию автора;
- использовать attach (присоединение);

- в случае больших объемов информации возможно использование общеизвестных архиваторов (ARJ, ZIP, RAR);
- в состав электронной версии рукописи должны входить:
- файл, содержащий текст рукописи со вставленными в него рисунками;
- отдельные файлы с рисунками высокого качества;
- файл со сведениями об авторах (полностью фамилия, имя, отчество, ученые степень и звание, место работы, служебный адрес и телефон, адрес электронной почты для оперативной связи);
- файл с переводом на английский язык следующей информации: ФИО авторов, аффилиация, адрес, название статьи, аннотация, ключевые слова, подрисуночные подписи, названия таблиц.

Авторы вставляют рисунки и таблицы в текст рукописи так, как считают нужным. Рукопись обязательно должна быть подписана автором, а при наличии нескольких авторов – всеми соавторами.

Редакция обращает внимание авторов на возможность и целесообразность использования цветного графического материала.

5. В начале рукописи должны быть указаны индекс УДК, название статьи, ФИО авторов (полностью), название и почтовый адрес учреждений, в которых выполнена работа, аннотация, содержащая основные результаты и выводы работы (в английском варианте не менее 1 000 знаков, русский вариант должен соответствовать английскому), ключевые слова, сведения о финансовой поддержке работы.

# Например:

УДК 29.19.37; 47.03.08
Оценка конвективного массопереноса
Иван Иванович Иванов
Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича
Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, Россия
ivan@academ.org, https://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx
Аннотация
Ключевые слова
Благодарности
Evaluation of Convective Mass Transfer
Ivan I. Ivanov
Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics
Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Novosibirsk, Russian Federation
Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Novosibirsk, Russian Federation ivan@academ.org, https://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx
Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Novosibirsk, Russian Federation ivan@academ.org, https://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx Abstract
Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Novosibirsk, Russian Federation ivan@academ.org, https://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx Abstract Keywords
Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Novosibirsk, Russian Federation ivan@academ.org, https://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx Abstract Keywords Acknowledgements
Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Novosibirsk, Russian Federation ivan@academ.org, https://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx Abstract Keywords Acknowledgements
Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Novosibirsk, Russian Federation ivan@academ.org, https://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx Abstract Keywords Acknowledgements Основной текст статьи

## Список литературы / References (в порядке цитирования)

#### Сведения об авторе / Information about the Author

Иванов Иван Иванович, доктор физико-математических наук, профессор Ivan I. Ivanov, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor WoS Researcher ID Scopus Author ID SPIN

Подпись автора (авторов)

6. Параметры страницы: формат – А4; ориентация – книжная; поля (*см*): слева – 2,5; справа – 1; сверху – 2,5; снизу – 2,3; от края до нижнего колонтитула – 1,3.

7. Основной текст: стиль – «Обычный»: гарнитура (шрифт) Times New Roman (Cyr), кегль (размер) 12 пунктов, абзацный отступ – 0,5 см, через 1,5 интервала, выравнивание – по ширине.

В тексте рукописи следует избегать аббревиатур, даже таких общепринятых, как ЭДС, ВТСП и т. п. Использование аббревиатур и простых химических формул в заголовках рукописей совершенно недопустимо. Следует писать: высокотемпературная сверхпроводимость, кремний, арсенид галлия и т. п., давая при необходимости соответствующую аббревиатуру или химическую формулу в тексте. Исключение могут составлять формулы сложных химических соединений. Каждое первое употребление аббревиатуры в тексте должно быть четко пояснено.

#### Не следует:

- производить табуляцию;
- разделять абзацы пустой строкой;
- использовать макросы, сохранять текст в виде шаблона и с установкой «только для чтения»;
- распределять текст по двум или более столбцам;
- расставлять принудительные переносы.

8. Таблицы должны иметь заголовки (на русском и английском языках). В таблицах обязательно указываются единицы измерения величин.

9. Число рисунков должно быть логически оправданным, качество – высоким. Файлы изображений должны находиться в том же каталоге, что и основной документ, и иметь имена, соответствующие номерам рисунков в рукописи (например, 09.tif или 22a.jpg).

10. Подписи к рисункам (на русском и английском языках) в электронной версии рукописи выполняются под рисунками, точка в конце не ставится. Если имеется несколько рисунков, объединенных одной подписью, они обозначаются русскими строчными буквами: а, б, в...

11. Формулы набираются в редакторе формул Microsoft Equation MathType в подбор к тексту или отдельной строкой по центру, кегль 11 пт.

Нумерация формул сквозная, в круглых скобках, прижатых к правому полю. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в тексте.

#### Настройки редактора формул

Define Sizes						×
Full	11	pt	•			ОК
Subscript/Superscript	58	8	•		$(1+B)^2$	Cancel
Sub-Subscript/Superscript	42	8	-		$\sum kp$	
Symbol	150	8	-		$L \mathbf{A}_{n_k}$	Help
Sub-symbol	100	8	-		p=1 ~~	
User 1	75	8	-			Apply
User 2	150	%	•	•	🔽 Use for new equati	ons Factory settings

а

efine Styles		
Simple	O Advanced	OK
Primary font:	Times New Roman	Cancel
Greek and math fonts:	Symbol and MT Extra	Help
🔽 Italic variables		Apply
🔲 Italic lower-case Gr	eek	Factory settings
		Use for new equations

б

12. Библиографические ссылки. В тексте в квадратных скобках арабскими цифрами указывается порядковый номер научного труда в библиографическом списке, например: [2; 3], [4–6] и т. д. В конце рукописи помещается список литературы в порядке упоминания в рукописи. Ссылки на российские издания приводятся на русском языке и сопровождаются переводом на английский язык (в отдельной строке, но под тем же номером). Библиографическое описание публикации включает: фамилию и инициалы автора, полное название работы, а также издания, в котором опубликована (для статей), город, название издательства, год издания, том (для многотомных изданий), номер, выпуск (для периодических изданий), объем публикации (количество страниц – для монографии, первая и последняя страницы – для статьи).

Ссылки на интернет-источники, базы данных и т. п. ресурсы, не поддающиеся библиографическому описанию, оформляются в виде примечаний (сносок).

13. В конце рукописи авторы могут поместить список использованных обозначений и сокращений.

14. Возвращение рукописи на доработку не означает, что рукопись уже принята к печати. Доработанный вариант необходимо прислать в редакцию в электронном виде с соблюдением всех требований вместе с ее начальной версией, рецензией и ответом на замечания рецензента не позднее двух месяцев со дня его отсылки. В противном случае первоначальная дата поступления рукописи при публикации не указывается. 15. Решение редакционной коллегии о принятии рукописи к печати или ее отклонении сообщается авторам.

В случае приема рукописи к публикации авторы должны прислать или передать в редакцию два бумажных экземпляра рукописи. Материалы печатаются на принтере на одной стороне стандартного (формат A4) листа белой бумаги. При этом тексты рукописи в бумажной и электронной версиях должны быть идентичными.

16. К рукописи прилагаются письмо от учреждения, в котором выполнена работа, и экспертное заключение о возможности ее опубликования в открытой печати. Если коллектив авторов включает сотрудников различных учреждений, необходимо представить направления от всех учреждений.

Сообщения, основанные на работах, выполненных в учреждении (учреждениях), должны содержать точное название и адрес учреждения (учреждений), публикуемые в статье.

17. После подготовки рукописи к печати редакция отправляет авторам электронную версию статьи с просьбой срочно сообщить в редакцию электронной почтой о замеченных опечатках для внесения исправлений в печатный текст.

18. После выхода журнала статьи размещаются на сайте физического факультета НГУ, а также на сайте Научной электронной библиотеки (elibrary.ru).

Адрес редакции

Физический факультет, к. 140 главного корпуса НГУ ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, редакция «Сибирского физического журнала»

тел. +7 (383) 363 44 25 physics@vestnik.nsu.ru