

СИБИРСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал
Основан в 2006 году

2024. Том 19, № 1

СОДЕРЖАНИЕ

Физика высоких энергий, ускорителей и высокотемпературной плазмы

- Бедарев Е. В., Кооп И. А., Отбоев А. В., Шатунов Ю. М.* Исследование возможности динамического управления спином поляризованных протонов и дейтронов на ускорительном комплексе NICA 5
- Черных А. Н., Булатов М. С., Жидков Д. А., Кленов Г. И., Кропачев Г. Н., Кулевова Т. В., Ларионов В. П., Ситников А. Л.* Модель магнито-оптической структуры протонного синхротрона комплекса протонной лучевой терапии НИЦ «Курчатовский институт» 16
- Щегольков Н. С., Павленко А. В., Журавлев А. Н., Крылов А. А., Морсин А. А., Сеньков Д. В., Жариков А. А.* Аппаратура и программное обеспечение системы управления каналом «бустер – нуклотрон» комплекса НИКА 23
- Овчинникова Л. Ю., Дуркин А. П., Курилик А. С., Парамонов В. В.* Регулировка выходной энергии в течение ВЧ-импульса в линейном ускорителе протонов для медицины 34
- Павлюченко В. А., Никифоров Д. А., Старостенко А. А., Жилыев К. В., Молокоядов А. М., Пахомов А. Ю., Субаев Е. А., Чекменёв Д. И., Ческидов В. Г.* Статус магнитных элементов инжектора СКИФ 43
- Кошкарёв А. М., Щудло И. М., Таскаев С. Ю.* Разработка и внедрение системы автоматизации ионного источника D-Race для ускорителя VITA 54
- Ли Р. В., Девятайкина Т. А., Никифоров Д. А.* Анализ реализации модифицированного пирсовского электрода 61
- Николайчук И. Ю., Борисов В. В., Голубицкий О. М., Золотых Д. А., Кондратьев Б.* Статус измерений положения магнитной оси квадрупольных магнитов коллайдера NICA 68

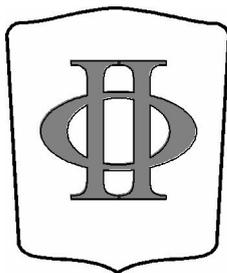
Физика жидкости, нейтральных и ионизованных газов

- Корнилов В. И., Пивоваров А. А., Попков А. Н.* К вопросу о визуализации течения в области вдува воздуха через перфорированный участок поверхности тела вращения 80

Физика твердого тела, полупроводников, наноструктур

- Мустафаева Д. Г., Магкоев Т. Т.* Термоэлектрические свойства халькогенидных полупроводниковых соединений и эффективность процесса преобразования 89

- Информация для авторов** 97



Сибирский физический журнал

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 рецензирования подтверждается их высокий научный статус.

Мы приглашаем научные коллективы и отдельных авторов направлять к нам для опубликования 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 Russian

2027. Volume 19, № 1

CONTENTS

High-Energy and Accelerator Physics, Physics of High-Temperature Plasma

- Bedarev E. V., Koop I. A., Otboev A. V., Shatunov Y. M.* Studying the Possibility of Dynamic Spin Handling for Polarized Protons and Deuterons at the NICA Accelerator Complex 5
- Chernykh A. N., Bulatov M. S., Zhidkov D. A., Klenov G. I., Kropachev G. N., Kulevoy T. V., Larionov V. P., Sitnikov A. L.* Model of the Magneto-Optical Structure of a Proton Synchrotron for the Proton Beam Therapy Complex NRC “Kurchatov Institute” 16
- Shchegolkov N. S., Pavlenko A. V., Zhuravlev A. N., Krylov A. A., Morsin A. A., Senkov D. V., Zharikov A. A.* Hardware and Software of the Booster Nuclotron Channel Control System of the NIKA Complex 23
- Ovchinnikova L. Yu., Durkin A. P., Kurilik A. S., Paramonov V. V.* Output Energy Regulation During RF Pulse in Proton Linac for Medicine 34
- Pavliuchenko V. A., Nikiforov D. A., Starostenko A. A., Zhilyaev K. V., Molokoedov A. M., Pakhomov A. Yu., Subaev E. A., Chekmenev D. I., Cheskidov V. G.* Status of Magnetic Elements of the SKIF Injector 43
- Koshkarev A. M., Shchudlo I. M., Taskaev S. Yu.* Development and Implementation of the D-Pace Ion Source Automation System for the VITA Accelerator 54
- Li R. V., Devyataykina T. A., Nikiforov D. A.* Analysis of a Modified Pierce Electrode Implementation 61
- Nikolaichuk I. Yu., Borisov V. V., Golubitsky O. M., Zolotykh D. A., Kondratiev B.* The State of Magnetic Axis Measurement of the Nica Collider Quadrupoles 68

Physics of a Fluid, Neutral and Ionized Gases

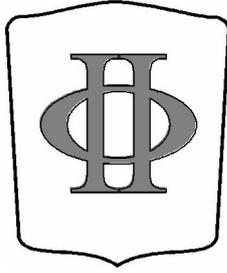
- Kornilov V. I., Pivovarov A. A., Popkov A. N.* Towards Flow Visualization in the Region of Air Blowing through the Perforated Section of a Body of Revolution 80

Educational and Methodological Provision of Teaching of Physics

- Mustafaeva D. G., Magkoev T. T.* Thermoelectric Properties of Chalcogenide Semiconductor Compounds and Conversion Process Efficiency 89

- Instructions for Contributors** 97

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 physico-technical computer science.

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 scientific 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 series is 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/>

Научная статья

УДК 539.1

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-5-15

**Исследование возможности динамического управления спином
поляризованных протонов и дейтронов
на ускорительном комплексе NICA***

**Егор Владимович Бедарев¹, Иван Александрович Кооп²
Алексей Валерьевич Отбоев³, Юрий Михайлович Шатунов⁴**

¹⁻⁴Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия

^{1,2}Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Россия

¹E.V.Bedarev@inp.nsk.su

Аннотация

В Объединенном институте ядерных исследований совместно с Институтом ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН планируется проведение экспериментов с ускорительным комплексом NICA, посвященных изучению спиновых эффектов в столкновениях поляризованных протонов и дейтронов. Как дополнение к программе физики спина предполагается провести эксперимент по проверке нарушения P -четности в pd -рассеянии на мишени. Для его осуществления необходимо изучить возможности получения пучка p или d с динамически устойчивой продольной поляризацией разного знака. В статье исследуется организация такой конфигурации спина с помощью ВЧ-ротаторов в кольце Nuclotron, моделируется процесс переворота спина пучка дейтронов и протонов с учетом синхротронных колебаний и энергетической диффузии. В результате делаются выводы о возможности получения динамически устойчивой продольной поляризации данным способом.

Ключевые слова

NICA, Nuclotron, динамическое управление спином, несохранение адронной четности

Для цитирования

Бедарев Е. В., Кооп И. А., Отбоев А. В., Шатунов Ю. М. Исследование возможности динамического управления спином поляризованных протонов и дейтронов на ускорительном комплексе NICA // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 1. С. 5–15. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-5-15

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

Studying the Possibility of Dynamic Spin Handling for Polarized Protons and Deuterons at the NICA Accelerator Complex

Egor V. Bedarev¹, Ivan A. Koop²
Alexey V. Otboev³, Yury M. Shatunov⁴

^{1,4}Budker Institute of Nuclear Physics of SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

^{1,2}Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russian Federation

¹E.V.Bedarev@inp.nsk.su

Abstract

At the Joint Institute for Nuclear Research together with the Institute of Nuclear Physics named after G. I. Budker SB RAS plans to carry out experiments with NICA accelerator complex dedicated to spin effects studying in polarized protons and deuterons collisions. As addendum to the spin physics program, it is being planned experiment by testing P -parity violation in pd -scattering at target. To carry out this experiment, it has to study the possibility of obtaining a p or d beam with dynamically stable longitudinal polarization with different signs. In this paper, we consider investigation of the organization for such configuration of spin using RF rotators in the Nuclotron ring. The spin flip process for deuterons and protons beam has simulated taking into account synchrotron oscillations and energy diffusion. Based on the obtained results, conclusions about opportunity of gaining dynamically stable longitudinal polarization for this way have done.

Keywords

NICA, Nuclotron, dynamic spin handling, hadronic parity nonconservation

For citation

Bedarev E. V., Koop I. A., Otboev A. V., Shatunov Yu. M.. Studying the possibility of dynamic spin handling for polarized protons and deuterons at the NICA accelerator complex. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 1, pp. 5–15 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-5-15

Введение

В настоящее время в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) совместно с Институтом ядерной физики СО РАН (ИЯФ) проходит подготовка к проведению экспериментов с ускорительным комплексом Nuclotron based Ion Collider fAcility (NICA), посвященных изучению Parton Distribution Functions (PDF), Transverse Momentum Dependent PDF, а также спин-зависимых эффектов в столкновениях pp и dd в диапазоне энергий 12–27 ГэВ и 4–13,8 ГэВ в с.ц.м. соответственно [1].

В рамках данной физической программы планируется эксперимент по проверке нарушения P -четности в рассеянии pd на жидкой мишени из водорода (LH) или воды (H₂O) [2]. Предлагаемый эксперимент представляет интерес в силу того, что в физике адронов феномен нарушения пространственной четности был мало изучен из-за сложности теоретических расчетов сильных взаимодействий и их экспериментальной проверки [3–6]. Изучение проявления несохранения адронной пространственной четности будет осуществлено путем измерения продольной асимметрии A_L , ожидаемой на уровне 10^{-7} [5]. Полученные экспериментальные данные дадут возможность проверить предсказания имеющихся теоретических моделей [7], что позволит осуществить проверку Стандартной модели (СМ).

Одной из основных задач, требующих решения для осуществления данного эксперимента, является получение пучка p или d с устойчивой продольной поляризацией с возможностью обеспечения режимов с ее противоположными направлениями, что накладывает требование на повторяемость эксперимента. Получение продольной поляризации, с учетом диктуемых требований, можно осуществить при помощи так называемых спиновых ВЧ-ротаторов с продольным или поперечным полем, осуществляющих динамическое управление поляризацией [8]. Таким образом, целью данной работы является проверка возможности получения продольной динамически устойчивой поляризации пучков p и d .

Помимо важности результатов данной работы в планировании предложенного эксперимента, актуальность данной работы обусловлена проведением экспериментов по изучению упомянутых спин-зависимых эффектов и PDF в столкновениях поляризованных пучков в коллайдерном кольце NICA, где требуется управление поляризацией. Например, одной из возможностей изучения распределений глюонов в нуклонах являются процессы с излучением прямого фотона. Одним из таких процессов является глюонное комтоновское рассеяние. Измерение двойной продольной асимметрии прямого фотона этого процесса A_{LL}^{γ} в столкновении двух продольно поляризованных пучков протонов позволяет определить поляризацию глюонов Δg , что важно для проведения исследований в рамках проблемы спинового кризиса нуклонов [1; 9].

Нарушение пространственной четности

Из-за наличия интерференции амплитуды сильного взаимодействия и P -нечетной амплитуды слабого взаимодействия возникает зависимость сечения от продольной степени поляризации пучка $p(d)$, что приводит к наличию ненулевой продольной асимметрии A_L :

$$A_L = \frac{\sigma_{\rightarrow} - \sigma_{\leftarrow}}{\sigma_{\rightarrow} + \sigma_{\leftarrow}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\rightarrow/\leftarrow}$ – полное сечение pd -рассеяния с продольной поляризацией пучка, направленной на мишень и в противоположном направлении. Измерение сечения pd -рассеяния с разной конфигурацией поляризации пучка d (p) на неполяризованной мишени из LH (H_2O) позволит определить величину A_L и сравнить с предсказаниями теоретических расчетов.

Схема эксперимента

Схема эксперимента по измерению продольной асимметрии предполагает использование кольца Nuclotron (рис. 1) и подразумевает следующие основные этапы.

1. Получение (1) и ускорение (2) поляризованных протонов и дейтронов в кольце.
2. Поворот спина в плоскость кольца (3, 4).
3. Однооборотная инжекция пучка в транспортный канал с внешней мишенью с заданной фазой прецессии спина.
4. Измерение коэффициента прохождения пучка через внешнюю мишень (5, 6).

Первый этап эксперимента является одной из отлаженных и рутинных процедур, проводимых в рамках работы ускорительного комплекса NICA, его подробное описание можно найти в [1]. После ускорения поляризованных пучков протонов или дейтронов начинается этап поворота поперечной поляризации в плоскость кольца («полуфлип»). Для осуществления «полуфлипа» будут использоваться спиновые ВЧ-ротаторы. В случае дейтронов (протонов) поворот будет осуществляться ВЧ-катушкой (ВЧ-полосковый промежуток), создающей продольное (поперечное) косинусоидальное поле с частотой ν_f . Контроль над амплитудой продольной поляризации будет реализован с помощью поляриметра с аналогичной концепцией, использу-

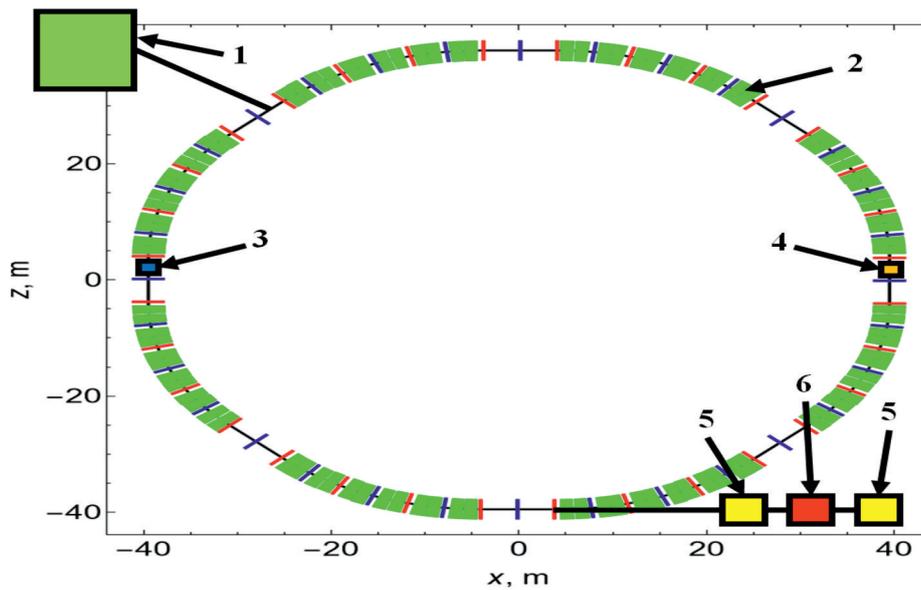


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 – источник поляризованных p и d ; 2 – ускорительное кольцо Nuclotron; 3 – спиновый ВЧ-ротатор (ВЧ-соленоид/полосковый ВЧ-ромежуток); 4 – поляриметр; 5 – детекторы для измерения коэффициента прохождения (вторично-эмиссионный детектор, или пояс Роговского); 6 – мишень (LH или H_2O)

Fig. 1. Experiment scheme:

1 – source of polarized p and d ; 2 – nuclotron accelerator ring; 3 – Spin RF-rotator (RF-solenoid/RF-strip gap); 4 – polarimeter; 5 – detectors for measuring passing coefficient (secondary emission detector or Rogowski coil); 6 – target (LH or H_2O)

ющейся на синхротроне Cosy [10]. После осуществления «полуфлипа» ВЧ-ротатор при этом не отключается, будет произведена однооборотная инжекция пучка в нужной фазе прецессии спина в транспортный канал с внешней мишенью из H_2O (LH). Контроль фазы прецессии будет производиться с помощью измерения фазы ВЧ-устройства соответственно. Заключительным этапом эксперимента является измерение коэффициента прохождения пучка через мишень с помощью вторично-эмиссионных детекторов или поясов Роговского, расположенных перед мишенью и после нее.

Адиабатический переворот спина внешним возмущением

Явление адиабатического переворота спина основано на так называемом адиабатическом пересечении ($|w_k|^2 \gg |\epsilon'|$) с постоянной скоростью изменения отстройки за оборот $|\epsilon'|$ уединенного резонанса ($|v - v_k| \lesssim |w_k|$) с амплитудой гармоники w_k и резонансной спиновой частотой v_k . Поведение равновесной степени поляризации при таком пересечении описывается в рамках формулы Фруассара – Стора [11]. Данный закон предсказывает смену знака равновесной степени поляризации при соблюдении упомянутых выше условий.

Организация резонансной гармоники будет осуществляться при помощи введения на азимуте спинового ВЧ-ротатора («флиппер») с гармоническим полем, ортогональным к равновесной степени поляризации с частотой v_f . Резонансные частоты при наличии такого «флиппера» задаются условием: $v - v_f = k$, где k – целое число. Само адиабатическое пересечение будет выполняться на резонансе с $k = 0$. Для соблюдения условия адиабатического пересечения подбираются соответствующие величины резонансных гармоник и скоростей изменения отстроек, которые в дальнейшем определяют параметры самих устройств. В случае дейтронов

(ВЧ-катушка) $|w_k| = 1 \cdot 10^{-4}$, $|\varepsilon'| = 1 \cdot 10^{-8}$, и в случае протонов (ВЧ-полосковый промежуток) $|w_k| = 3 \cdot 10^{-4}$ и $|\varepsilon'| = 2 \cdot 10^{-7}$.

Возмущения спина в резонансной области

Рассмотрим влияние синхротронных колебаний и энергетической спиновой диффузии на поведение спина в резонансной области. Влияние же бетатронного движения предполагается усредненным, а частоты – вдали от спин-бетатронных резонансов. Теория спиновой динамики, на которой основаны приведенные вычисления, содержится в [12].

Наличие синхротронных колебаний приводит к появлению резонансов спутников, отстающих друг от друга на синхротронную частоту ν_s ($\nu_{km} = k + m\nu_s$, m – целое число), и перераспределению между ними мощности резонанса $w_{km} = w_k J_m(\sigma/\nu_s)$, где $\sigma = \gamma \frac{\partial \nu}{\partial \gamma} \delta_0$ – амплитуда модуляции, δ_0 – амплитуда синхротронных колебаний, J_m – функция Бесселя m -порядка. Для кольца Nuclotron амплитуда модуляций определяется как $\sigma = \nu_0 \delta_0$, где $\nu_0 = \gamma G$, G – G -фактор частицы.

В случае дейтронов $G = -0,143$, $E = 2,111$ ГэВ, $\nu_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$, $\delta_0 = 10^{-3}$ имеем: $\gamma \frac{\partial \nu}{\partial \gamma} = -0,161$, $\sigma = -1,61 \cdot 10^{-4}$, $|w_{k0}| = 9,971 \cdot 10^{-5}$ (основной резонанс $m = 0$). Из полученных расчетов видно, что полученная малая амплитуда модуляции позволяет осуществить переворот при данных параметрах пучка на основной резонансной гармонике и требует лишь выбора первоначальной отстройки для удаленности от спутниковых резонансов: $\varepsilon_0 = 5 \cdot 10^{-4}$. Наоборот обстоит ситуация с протонами. Из-за большого G -фактора ($G = 1,8$) амплитуда модуляции принимает большое значение $E = 2,51$ ГэВ, $\nu_s = 3,2 \cdot 10^{-3}$, $\delta_0 = 10^{-3}$: $\gamma \frac{\partial \nu}{\partial \gamma} = 4,82$, $\sigma = 4,82 \cdot 10^{-3}$, $|w_{k0}| = 1,53 \cdot 10^{-4}$, что означает ослабление в 1,97 раза и приводит к нарушению адиабатичности (уменьшение параметра адиабатичности практически в 4 раза, $\sim |w_k|^2 / |\varepsilon'|$). Переворот

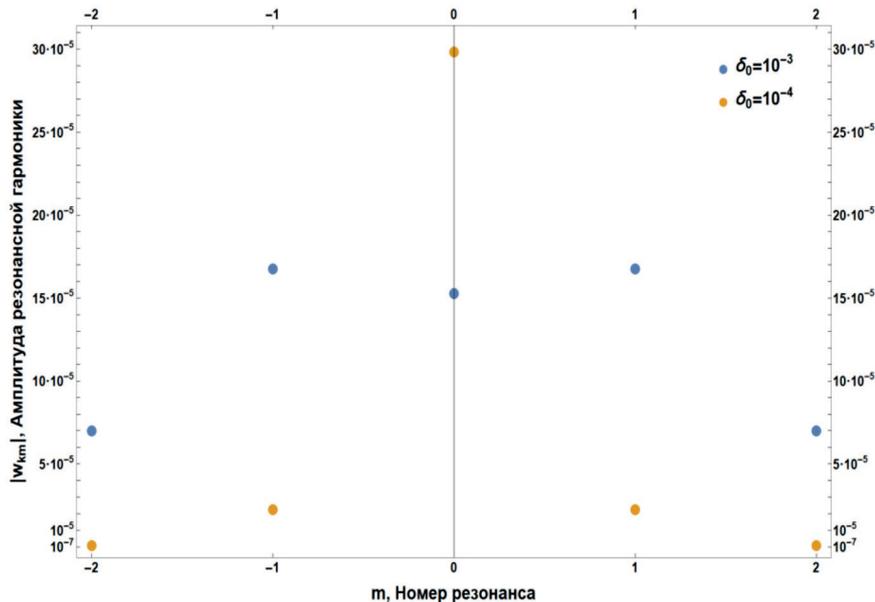


Рис. 2. Зависимость мощности резонанса от номера спутника m для случая протонов.

Синие точки соответствуют случаю $\delta_0 = 10^{-3}$, а оранжевые – $\delta_0 = 10^{-4}$

Fig. 2. Dependence of resonance power versus satellite number m for proton case.

Blue points correspond to the case $\delta_0 = 10^{-3}$, and orange points $\delta_0 = 10^{-4}$ respectively

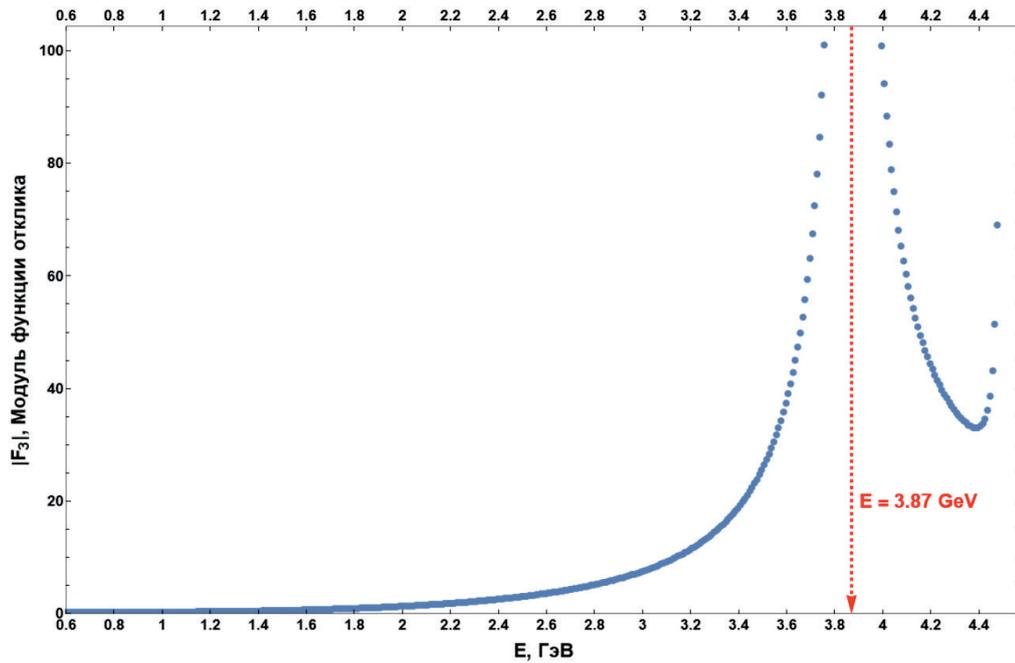


Рис. 3. Зависимость модуля спиновой функции отклика F_3 от энергии E (ГэВ) для оптики кольца Nuclotron с $Q_x = 7,45$, $Q_z = 7,4$, рассчитанной при помощи программы ASPIRIN [13].

Красная пунктирная линия соответствует спин-бетатронному резонансу $Q_z = 7,4$

Fig. 3. Dependence of module for spin response function F_3 versus energy E (GeV) for Nuclotron optics with $Q_x = 7.45$, $Q_z = 7.4$ calculated by program ASPIRIN [13]

на резонансах сателлитах тоже не представляется возможным в силу их малости (рис. 2). Использование более медленного пересечения ограничено сильным влиянием процесса энергетической спиновой диффузии со стороны внутривидового рассеяния, что требует быстрого переворота (обсуждается ниже). В силу данных обстоятельств требуется охлаждение пучка до $\delta_0 = 10^{-4}$: $|w_{k0}| = 2,98 \cdot 10^{-4}$ и $\varepsilon_0 = 3 \cdot 10^{-3}$.

Помимо требования малого энергетического разброса, необходимо следить за влиянием поперечных спин-бетатронных резонансов. Данная проблема возникает в силу наличия резонансных множителей, отвечающих за так называемые intrinsic-резонансы, в спиновой функции отклика F_3 (рис. 3) (отклик на создаваемую раскачку поперечных бетатронных колебаний радиальным возмущением), определяющей мощность резонансной гармоники: $w_k = \theta_r |F_3|$, где θ_r – угол раскачки вертикальных колебаний полосковым промежутком. В случае оптики кольца Nuclotron ($Q_x = 7,45$, $Q_z = 7,4$) F_3 содержит резонансный множитель, соответствующий спин-бетатронному резонансу $Q_z = 7,4$ ($E = 3,87$ ГэВ). Далее перейдем к рассмотрению энергетической диффузии.

Наличие энергетической диффузии вследствие внутривидового рассеяния приводит к конечному времени когерентности спинов в ансамбле частиц (спиновая энергетическая диффузия). Для расчета характерного времени когерентности были использованы результаты теоретических расчетов энергетического разброса [14] из-за многократного рассеяния. В случае пучка с гауссовым распределением, в приближении малости продольной температуры по сравнению с поперечной, получается следующее время когерентности:

$$\tau_d = \frac{8\gamma^3 \sigma_z \sqrt{\beta_x \varepsilon_x^3} |w_{k0}|^2}{L_c N r_{p/d}^2 \beta c v_0^2}, \quad (2)$$

где N – число частиц в пучке, β_x , ε_x , σ_z – радиальный эммитанс, бета-функция и продольный

размер пучка, β , γ – бета- и гамма-факторы, L_c – кулоновский логарифм, $r_{p/d}$ – классический радиус протона или дейтрона. Для характерных параметров пучка протонов и дейтронов $\varepsilon_x = 1$ мм · мрад, $\beta_x = 800$ см, $\sigma_z = 60$ см, $N = 2,07 \cdot 10^{10}$, $L_c \sim 20$, $E_1 = 2,111$ ГэВ, $E_2 = 2,51$ ГэВ оценка времени когерентности составила: $\tau_1 = 222,12$ с (дейтроны) и $\tau_2 = 3,71$ с (протоны). Полученные времена показывают, что в случае протонов необходимо осуществлять переворот в 20 раз быстрее, чем в случае дейтронов: $|\varepsilon'| = 2 \cdot 10^{-7}$.

Таким образом, из полученных расчетов видно, что основным ограничением на использование данного метода получения динамически устойчивой продольной поляризации является энергетическая спиновая диффузия из-за многократного внутривпучкового рассеяния, которое ограничивает время работы с включенным флиппером при осуществлении «полуфлипа» и достижения нужной фазы прецессии спина при однооборотной инжекции. Как следствие, этот же эффект будет выступать ограничением и в применении данного метода динамического управления спином ансамбля частиц в коллайдерном кольце NICA для реализации экспериментов по изучению спин-зависимых эффектов.

Моделирование переворота спина

Моделирование движения спина производилось при помощи многооборотного «спин-трекинга» в $O(3)$ представлении реализованного при помощи системы Wolfram Mathematica. Сам расчет производился ($i = 1$ дейтроны и $i = 2$ протоны) для ансамблей из $N_1 = N_2 = 10^2$ частиц, имеющих стационарное нормальное распределение с энергетическим разбросом $\sigma_{\delta_1} = 0,71 \cdot 10^{-4}$, $\sigma_{\delta_2} = 0,71 \cdot 10^{-5}$ и начальной средней по ансамблю $\langle \vec{S} \rangle_1 = \langle \vec{S} \rangle_2 = 1$ вертикальной степенью поляризации. Эволюция синхротронных колебаний отслеживалась путем вращения вектора $\vec{\psi} = (\varphi, \delta)$, где φ – нормализованный сдвиг фазы от синхронной частицы и δ – энергетический разброс. Энергетическая диффузия реализована при помощи однооборотных флуктуаций δ , имеющих нормальное распределение с дисперсией σ_{noise} , соответствующей среднеквадратичному разбросу энергетических флуктуаций за n оборотов $\sigma_{noise} = \sigma_{\delta} / \sqrt{n}$ и $\sigma_{noise_1} = 10^{-5}$ ($n_1 = 10^5$), $\sigma_{noise_2} = 10^{-6}$ ($n_1 = n_2$).

На рис. 4 приведен график вертикальной проекции степени поляризации в зависимости от оборота для ансамбля дейтронов. Из представленной зависимости видно, что для выбранных параметров кольца Nuclotron адиабатический переворот был реализован, что означает возможность осуществления «полуфлипа» в плоскость ускорительного кольца, при этом процесс энергетической диффузии не успел сработать: $T_{flip} = 2(\varepsilon_0 / |\varepsilon'|) T_0 = 1,83 \cdot 10^{-1}$ с $< \tau_1$, где T_0 – время обращения пучка. Далее, на рис. 5 представлена аналогичная зависимость только для протонов. В данном случае также возможен переворот, однако при увеличенной синхротронной частоте (в 2,13 раза) и скорости пересечения (в 20 раз, $T_{flip} = 2,71 \cdot 10^{-2}$ с $< \tau_2$), к тому же требуется снижение амплитуды энергетического разброса в 10 раз по сравнению с параметрами дейтронов.

Отметим, что для уменьшения амплитуды прецессии в процессе переворота в обоих случаях использовалось адиабатическое включение ВЧ-ротатора (рис. 6) (пример дейтронов). При этом условие адиабатичности при таком включении ротатора не нарушается в течение всего переворота.

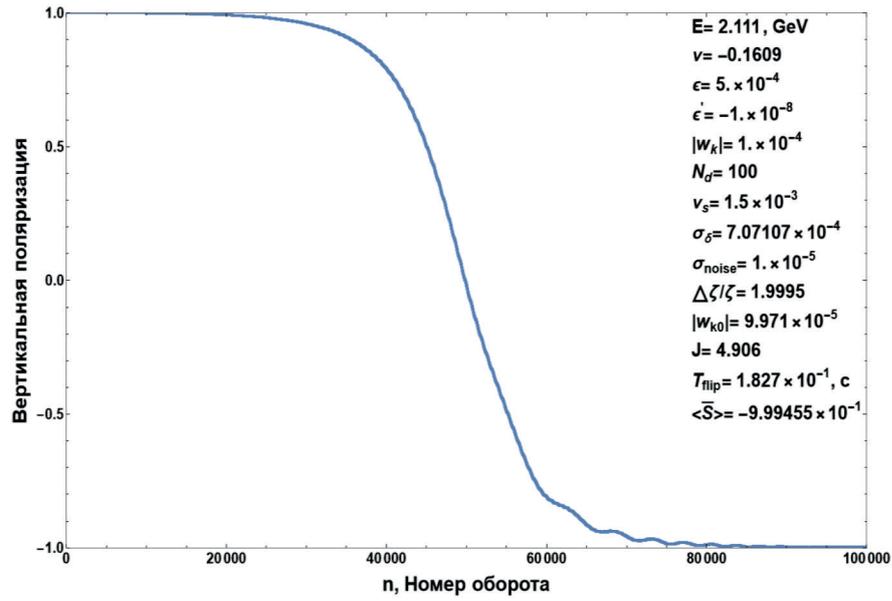


Рис. 4. График зависимости вертикальной степени поляризации ансамбля дейтронов от номера оборота n .

Параметры флиппера: $|w_k| = 1 \cdot 10^{-4}$, $|\epsilon'| = 1 \cdot 10^{-8}$

Fig. 4. Dependence graph for vertical polarization degree of deuterons ensemble versus turn number n .

“Flipper” parameters $|w_k| = 1 \cdot 10^{-4}$, $|\epsilon'| = 1 \cdot 10^{-8}$

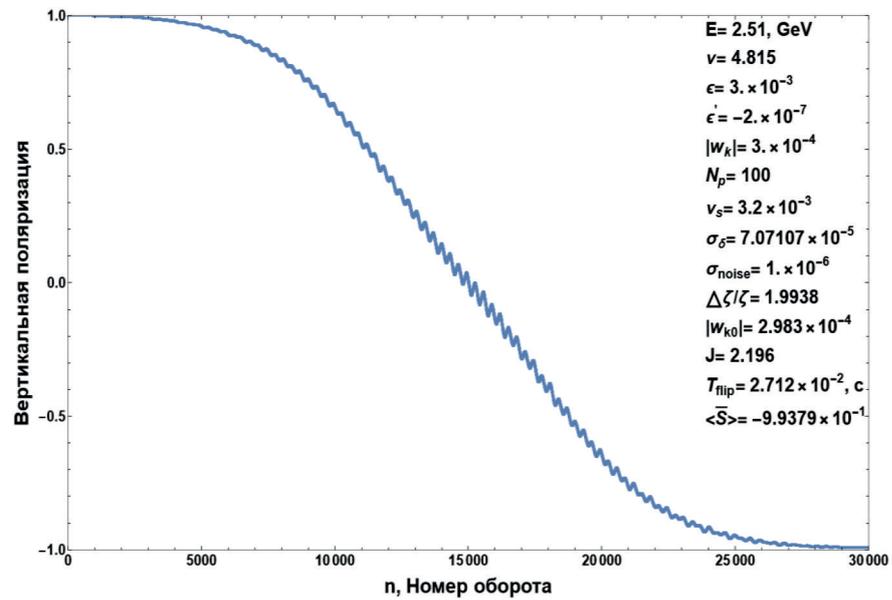


Рис. 5. График зависимости вертикальной степени поляризации ансамбля протонов от номера оборота n .

Параметры флиппера: $|w_k| = 3 \cdot 10^{-4}$, $|\epsilon'| = 2 \cdot 10^{-7}$

Fig. 5. Dependence graph for vertical polarization degree of protons ensemble versus turn number n .

“Flipper” parameters $|w_k| = 3 \cdot 10^{-4}$, $|\epsilon'| = 2 \cdot 10^{-7}$

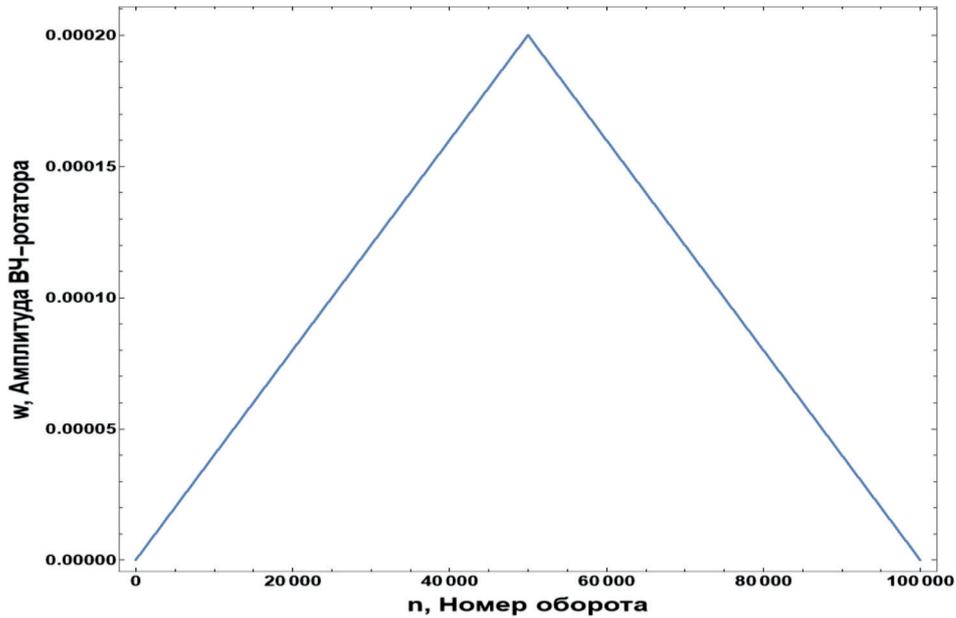


Рис. 6. Зависимости амплитуды ВЧ-ротатора с продольным полем $w = 2|w_k|$ от номера оборота n
 Fig. 6. Dependence for amplitude of RF-rotator with longitudinal field $w = 2|w_k|$ versus turn number n

Заключение

В рамках данной работы было выполнено следующее.

- Изучено влияние синхротронных колебаний и энергетической диффузии из-за внутрипучкового рассеяния на адиабатический переворот. Показано, что «полуфлип» на основном резонансе с выбранными параметрами пучка в случае дейтронов (ВЧ-ротатора с продольным полем) с учетом синхротронных колебаний и энергетической диффузии может быть выполнен в силу малой подавленности основной гармоники и малого времени переворота по сравнению с временем когерентности в резонансной области $T_{flip} \ll 222,12$ с. В случае протонов (ВЧ-ротатор с поперечным полем) необходимо производить быстрый переворот из-за сильного влияния внутрипучкового рассеяния $T_{flip} \ll 3,71$ с, имея охлажденный пучок с $\delta_0 \sim 10^{-4}$ и увеличенную в 2 раза синхротронную частоту.
- Рассчитано время когерентности спина в резонансной области. Получено, что основным процессом деполяризации спина ансамбля пучка является внутрипучковое рассеяние, определяющее полное возможное время работы с ВЧ-ротатором при проведении предложенного эксперимента, а также время на осуществление полного переворота в экспериментах с коллайдером NICA. Также получено, что спин ансамбля протонов более подвержен влиянию данного эффекта по сравнению со спином ансамбля дейтронов.
- Проведено моделирование адиабатического переворота спина при помощи спинового ВЧ-ротатора с продольным и поперечным полем для ансамбля дейтронов и протонов в кольце Nuclotron.

На основании полученных результатов моделирования и расчетов было показано, что использование динамического управления спином при помощи ВЧ-ротатора с продольным и поперечным полем в кольце Nuclotron возможно. Однако из-за влияния многократного внутрипучкового рассеяния появляются ограничения на возможность использования данного метода и при работе с пучками протонов выдвигаются более высокие требования к их параметрам.

Список литературы/References

1. Savin I. A., Efremov A. V., Peshekhonov D. V., Kovalenko A. D., Teryaev O. V., Shevchenko O. Yu., Nagajcev A. P., Guskov A. V., Kukhtin V. V., Topilin N. D. et al. Spin Physics Experiments at NICASPD with polarized proton and deuteron beams. *EPJ Web of Conferences: 4th International Workshop on Transverse Polarisation Phenomena in Hard Processes (TRANSVERSITY 2014)*, 2015, vol. 85, id. 02039.
2. Koop I. A., Milstein A. I., Nikolaev N. N. et al. Tests of Fundamental Discrete Symmetries at the NICA Facility: Addendum to the Spin Physics Programme. *Physics of Particles and Nuclei*, 2021, vol. 52, pp. 549–554.
3. Gardner S., Haxton W. C., and Holstein Barry R. A New Paradigm for Hadronic Parity Nonconservation and Its Experimental Implications. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 2017, vol. 67, pp. 69–95.
4. Kistryn S., et al. Precision Measurement of Parity Nonconservation in Proton-Proton Scattering at 45 MeV. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, vol. 58, pp. 1616–1619.
5. Lockyer N. A. et al. Parity nonconservation in protonnucleus scattering at 6 GeV/c. *Phys. Rev. D*, 1984, vol. 30, pp. 860–871.
6. Grosnick D. P. et al. Measurement of the differences in the total cross section for antiparallel and parallel longitudinal spins and a measurement of parity nonconservation with incident polarized protons and antiprotons at 200 GeV/c. *Phys. Rev. D*, 1997, vol. 55, pp. 1159–1187.
7. Milstein A. I., Nikolaev N. N., Salnikov S. G. Parity Violation in Proton-Deuteron Scattering. *JETP Letters*, 2020, vol. 112, no. 6, pp. 332–336.
8. Koop I., Shatunov Yu. Spin flip by RF-field at storage rings with siberian snakes. *AIP Conf. Proc. 1 September 1995, USA*, 1995, vol. 343, pp. 317–320.
9. Cheng H. Y., Lai S. N. Spin asymmetry in protonproton collisions as a probe of sea and gluon polarization in a proton. *Phys. Rev. D*, 1990, vol. 41, pp. 91–102.
10. Bagdasarian Z. et al. Measuring the polarization of a rapidly precessing deuteron beam. *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, 2014, vol. 17, pp. 052803.
11. Froissart M., Stora R. Depolarisation d'un faisceau de protons polarises dans un synchrotron. *Nuclear Instruments and Methods*, 1960, vol. 7, iss. 3, pp. 297–305.
12. Кондратенко А. М. Поляризованные пучки в накопителях и циклических ускорителях. Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук, 01.04.02 – теоретическая и математическая физика, ИЯФ СО АН СССР. 1982.
13. Perevedentsev E. A., Shatunov Yu. M., Ptitsyn V. I. Spin orbital function formalism and ASPIRRIN code. *Proc. of 15th Int. spin physics symp. (SPIN 2002)*, Long Island, New York, USA, 2002, pp. 761–765.
14. Chao A. W., Tigner M. et al. Handbook of Accelerator Physics and Engineering. Second Ed. World Scientific Co. Pte. Ltd., Singapore, 2013, p. 155.

Сведения об авторах

Бедарев Егор Вадимович, инженер-исследователь

Кoop Иван Александрович, доктор физико-математических наук

Отбоев Алексей Валерьевич, научный сотрудник

Шатунов Юрий Михайлович, доктор физико-математических наук

Information about the Authors

Egor V. Bedarev, Research Engineer

Ivan A. Koop, Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Alexey V. Otboev, Researcher

Yuri M. Shatunov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences

*Статья поступила в редакцию 19.09.2023;
одобрена после рецензирования 09.11.2023; принята к публикации 09.01.2024*

*The article was submitted 19.09.2023;
approved after reviewing 09.11.2023; accepted for publication 09.01.2024*

Научная статья

УДК 616-71/-78

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-16-22

Модель магнито-оптической структуры протонного синхротрона комплекса протонной лучевой терапии НИЦ «Курчатовский институт»*

Алексей Николаевич Черных¹, Михаил Сергеевич Булатов²
Дмитрий Алексеевич Жидков³, Геннадий Иванович Кленов⁴
Геннадий Николаевич Кропачев⁵, Тимур Вячеславович Кулевой⁶
Владимир Петрович Ларионов⁷, Алексей Леонидович Ситников⁸

НИЦ «Курчатовский институт»
Москва, Россия

¹Chernykh_AN@nrcki.ru

²Bulatow_MS@nrcki.ru

³Zhidkov_DA@nrcki.ru

⁴Klenov_GI@nrcki.ru

⁵Kropachev@itep.ru

⁶Kulevoy@itep.ru

⁷Larionov_VP@nrcki.ru

⁸Sitnikov@itep.ru

Аннотация

В рамках реализации Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019–2027 гг. на базе Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (далее – НИЦ «Курчатовский институт») создается новейший научно-образовательный медицинский центр ядерной медицины (НОМЦ ЯМ). В задачу сооружения НОМЦ ЯМ также входит строительство центра протонной лучевой терапии, который должен стать базой долговременных многолетних разработок оборудования и технологий протонной лучевой терапии новых поколений, их внедрения в практическое здравоохранение путем тиражирования в субъектах Российской Федерации и дружественных странах, а также подготовки кадров (медицинских физиков и клиницистов). В статье представлены результаты эскизного проектирования ускорительного оборудования для создаваемого комплекса протонной лучевой терапии, который реализуется на базе протонного синхротрона.

Ключевые слова

протонная лучевая терапия, ускорители, синхротрон, линейный ускоритель протонов

Для цитирования

Черных А. Н., Булатов М. С., Жидков Д. А., Кленов Г. И., Кропачев Г. Н., Кулевой Т. В., Ларионов В. П., Ситников А. Л. Модель магнито-оптической структуры протонного синхротрона комплекса протонной лучевой терапии НИЦ «Курчатовский институт» // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 1. С. 16–22. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-16-22

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

© Черных А. Н., Булатов М. С., Жидков Д. А., Кленов Г. И., Кропачев Г. Н., Кулевой Т. В., Ларионов В. П., Ситников А. Л., 2024

Model of the Magneto-Optical Structure of a Proton Synchrotron for the Proton Beam Therapy Complex NRC “Kurchatov Institute”

Alexey N. Chernykh¹, Michael S. Bulatov², Dmitriy A. Zhidkov³
Gennady I. Klenov⁴, Gennady N. Kropachev⁵, Timur V. Kulevoy⁶
Vladimir P. Larionov⁷, Alexey L. Sitnikov⁸

NRC “Kurchatov Institute”,
Moscow, Russia

¹Chernykh_AN@nrcki.ru

²Bulatov_MS@nrcki.ru

³Zhidkov_DA@nrcki.ru

⁴Klenov_GI@nrcki.ru

⁵Kropachev@itep.ru

⁶Kulevoy@itep.ru

⁷Larionov_VP@nrcki.ru

⁸Sitnikov@itep.ru

Abstract

As part of the implementation of the Federal Scientific and Technical Program for the Development of Synchrotron and Neutron Research and Research Infrastructure for 2019–2027, a scientific and educational medical nuclear medicine center (SEMC NM). The task of constructing the SEMC NM also includes the construction of a proton beam therapy center, which should become the basis for long-term development of equipment and technologies for new generations of proton beam therapy, their implementation in practical healthcare by replicating in the constituent entities of the Russian Federation and friendly countries, as well as training personnel (medical physicists and clinicians). The article presents the results of preliminary design of the accelerator equipment for the created proton beam therapy complex, which is implemented on the basis of the proton synchrotron.

Keywords

proton beam therapy, accelerators, synchrotron, linear proton accelerator

For citation

Chernykh A. N., Bulatov M. S., Zhidkov D. A., Klenov G. I., Kropachev G. N., Kulevoy T. V., Larionov V. P., Sitnikov A. L. Model of the magneto-optical structure of a proton synchrotron for the proton beam therapy complex NRC “Kurchatov Institute”. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 1, pp. 16–22 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-16-22

Введение

Правительство РФ в марте 2020 г. утвердило Федеральную научно-техническую программу развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019–2027 гг. (ФНТП). В соответствии с Указом НИЦ «Курчатовский институт» был определен головной научной организацией Программы¹.

Программа предусматривает создание новейшего научно-образовательного медицинского центра ядерной медицины, в состав которого входит несколько комплексов адронной лучевой терапии. Одним из таких комплексов является Комплекс протонной лучевой терапии (ПЛТ), создаваемый на территории НИЦ «Курчатовский институт» как база для долговременных многолетних разработок новых поколений оборудования и технологий ПЛТ, подготовки кадров (медицинских физиков и клиницистов), проведения клинических исследований и лечения ограниченного контингента онкологических пациентов, а также внедрения технологий в прак-

¹ Постановление Правительства Российской Федерации от 16.03.2020 г. № 287. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202003260022?ysclid=lku5ho2vfh319276837> (дата обращения: 02.08.2023).

тическое здравоохранение путем тиражирования в субъектах Российской Федерации и дружественных странах.

Комплекс протонной лучевой терапии будет реализован на базе протонного синхротрона после ускорения, в котором до требуемой энергии в диапазоне от 70 до 250 МэВ протонный пучок будет доставляться к двум процедурным кабинетам. Один кабинет с системой поворота протонного пучка – гантри [1] и один – с фиксированным в горизонтальной плоскости направлением протонного пучка (рис. 1).

В рамках реализации проекта ведется проработка ускорительного оборудования – ионного источника протонов, инжектора – линейного ускорителя, синхротрона и каналов транспортировки к процедурным кабинетам.

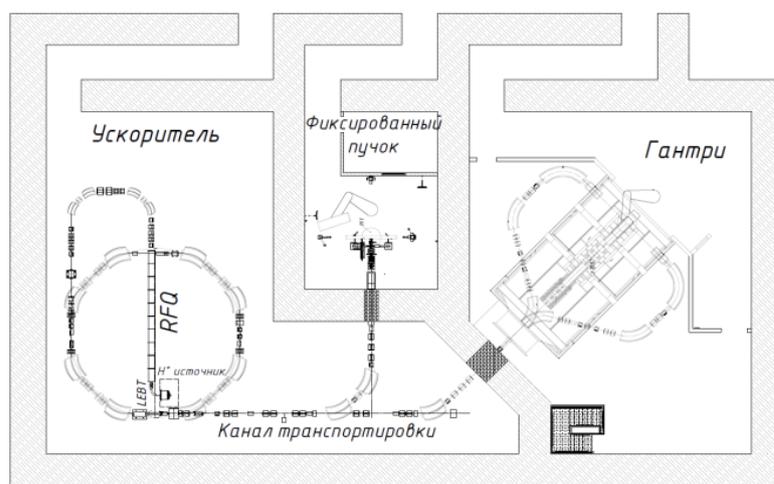


Рис. 1. Схема компоновки ускорительного оборудования Комплекса протонной лучевой терапии
Fig. 1. Layout diagram of the accelerator equipment of the proton radiation therapy complex

1. Проект синхротрона

Сильнофокусирующая структура кольца выполнена по схеме с разделенными функциями, включающей магниты с однородным полем и краевой фокусировкой, а также фокусирующую систему из квадрупольных магнитов (рис. 2). По результатам проведенного исследования определены основные параметры синхротрона (табл. 1).

На диаграмме частот предварительно выбрана рабочая точка с частотами $Q_x = 2,69$ и $Q_z = 1,45$, находящаяся вблизи линии резонанса третьего порядка $Q_x = 2,666 = 8/3$ или $3Q_x = 8$. Такой выбор связан с отсутствием в этой области связи с Q_z .

На кольце с периметром 30,3 м установлено восемь 45-градусных дипольных магнитов Н-образного типа, радиус поворота выбран 1,62 м. Для обеспечения краевой фокусировки у дипольных магнитов на входе и выходе приняты угловые скосы $\phi = (+37,9)$ градуса.

Магнитная структура кольца содержит четыре ахроматичных 90-градусных поворота, в каждый из которых входит два ближайших соседних 45-градусных магнита и размещенный посередине между ними фокусирующий магнитный квадруполь. Промежуток между магнитами имеет длину 1,2 м. Во всех четырех больших промежутках (два из которых имеют длину 3 м, а два – 2,7 м) линейная и угловая компоненты дисперсии как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях равны нулю.

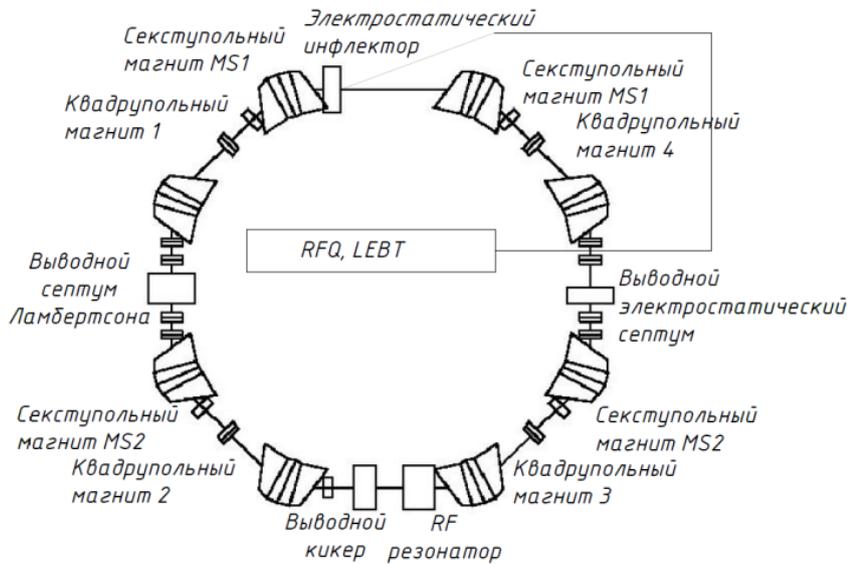


Рис. 2. Магнито-оптическая структура синхротрона
Fig. 2. Magneto-optical structure of the synchrotron

Таблица 1

Основные параметры протонного синхротрона

Параметр	Значение
Частицы	Протоны
Энергия инжекции	5 МэВ
Энергия вывода	70–250 МэВ
Длина орбиты	30,3 м
Число поворотных магнитов	8
Нормализованный эмиттанс	1 π мм-мрад
Частота бетатронных колебаний в рабочей точке	2,69 (горизонт.)/1,45 (вертик.)
Вывод	Медленный: секступольный резонанс Быстрый: 10 мс
Частота циклов ускорений	$\sim 0,7$ Гц

В каждом из выводных 2,7-метровых промежутках расположены четыре квадрупольные линзы полярностью DFFD, предназначенные для формирования в этом промежутке большой горизонтальной амплитудной функции $\beta_x \cong 90,2$ м, необходимой для облегчения вывода пучка (рис. 3).

2. Магнито-оптическая структура

На рис. 3 представлены результаты анализа кольца по программе WinAgile [2]. Начало линейной развертки кольца (с обходом против часовой) соответствует месту инжекции пучка в середину 3-метрового промежутка с помощью электростатического инфлектора. Для инжектируемого пучка при $W_k = 5$ МэВ геометрический эмиттанс (произведение полуосей) $\epsilon_x = \epsilon_z = 10$ мм мрад и $\Delta P/P = 0,002$, В местах 90-градусных поворотов также размещены секступольные линзы для регулировки хроматичности магнитной системы.

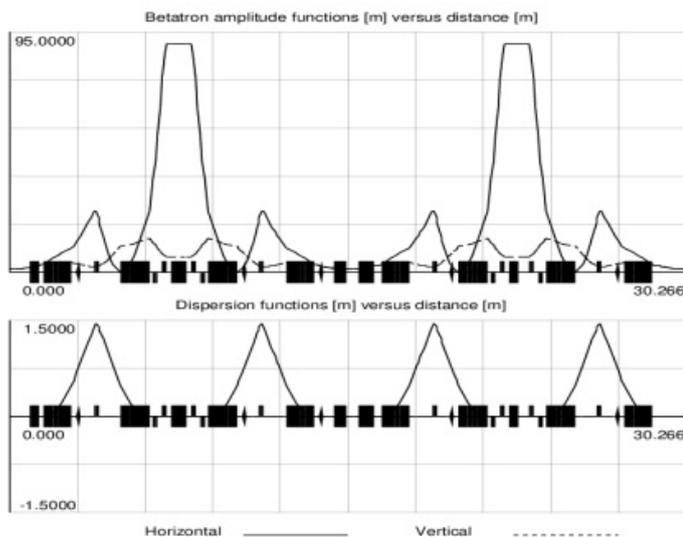


Рис. 3. Twiss-параметры структуры кольца
 Fig. 3. Twiss parameters of the ring structure

Максимальное значение дисперсии в области 90-градусного поворота составляет $D_x \cong 1,5$ м. В следующем 2,7-метровом промежутке кроме 4-квадрупольных линз расположен септум Ламбертсона для вывода пучка по вертикали. В следующем 3-метровом промежутке расположены: секступольная линза для возбуждения резонанса 3-го порядка, выводной ВЧ-толкатель (RF-knock out) и ускоряющий ВЧ-резонатор. В следующем 2,7-метровом промежутке кроме 4-квадрупольных линз находится электростатический септум для вывода пучка по горизонтали.

3. Ввод и вывод протонного пучка

В качестве инжектора предлагается импульсный протонный ускоритель с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ) с энергией 5 МэВ, резонансной частотой 162,5 МГц и током 30 мА (табл. 2). При токе инжекции 30 мА и нормализованном эмиттансе $0,75 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ транспорт в канале RFQ составляет 99,7 %, а трансмиссия – 99,3 %. При этом разброс по импульсам $\Delta p/p$ на выходе RFQ для 90 % частиц не превышает $\pm 0,6$ %. Рост поперечного эмиттанса составляет 1,2 (эмиттанс содержит 90 % пучка). Отметим, что значение транспорта и трансмиссии ожидается не меньше 95 % в широком диапазоне изменения входного эмиттанса. Таким образом, разрабатываемый канал RFQ удовлетворяет основным требованиям, представленным в табл. 2.

В разрабатываемом протонном синхротроне предполагается применить две системы вывода, рассчитанные на диапазон энергий (70 ÷ 250) МэВ: медленный вывод пучка, длительно­стью до 1 секунды и быстрый вывод за 10 мс.

Для реализации систем вывода в магнито-оптической структуре синхротрона предусмотрены электростатический септум, септум магнит Ламбертсона и выводной ВЧ-толкатель (RF-knock out).

Таблица 2

Основные параметры RFQ

Параметр	Значение
Частота ускоряющего поля, МГц	162,5
Ускоряемые частицы	H ⁺
Ток инжекции, мА	30
Напряжение инжекции, кВ	45
Максимальная напряженность поля на поверхности электродов (по критерию Килпатрика)	1,8 Кр
Максимальная напряженность поля на поверхности электродов, кВ/см	250
Энергия частиц, МэВ	0,045 ÷ 5,0
Нормализованный эмиттанс пучка, $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	0,75
Нормализованный аксептанс канала, $\pi \text{ мм мрад}$	2,4
Отношение аксептанса канала к эмиттансу пучка	3
Синхронная фаза, град	-90 ÷ -35
Напряжение между смежными электродами, кВ	129
Средний радиус, мм	6,5
Радиус электрода, мм	5,2
Максимальный коэффициент модуляции	2,8
Длина ускорителя, мм	7002

Заключение

В статье представлены результаты предварительного исследования конструкции протонного медицинского синхротрона для центра ПЛТ НИЦ «Курчатовский институт».

Кольцо выполнено по схеме с жесткой фокусировкой при $Qxz > 1$, за счет чего уменьшается амплитуда бетатронных колебаний по вертикали в дипольных магнитах, что в свою очередь призвано снизить апертуру, габариты и вес дипольного магнита. В нашем случае межполюсный зазор в дипольном магните равен 50 мм.

Амплитудные функции в кольце резко неоднородны; в выводных промежутках beta-x достигает 90,2 м, что облегчает конструктивное исполнение выводных септумов.

Частота бетатронных (поперечных) колебаний значительно превосходит круговую частоту, за счет чего устраняется связь с продольными колебаниями.

Хроматические секступоли MS1 и MS2, расположенные в промежутках с ненулевой дисперсией, позволяют регулировать хроматичности кольца по обоим направлениям в широком диапазоне: имеем $dQx/dp/p = -22,8$ и $dQz/dp/p = -6,2$ при нулевых градиентах секступолей и нулевые хроматичности при нормализованных градиентах MS1 = -86,3 [1/м³], MS2 = + 72,7 [1/м³].

В ближайшем будущем мы будем изучать вопросы динамики пучка, включая инжекцию, ускорение и вывод, а также разрабатывать технический проект линейного ускорителя.

Работа поддержана Национальным исследовательским центром «Курчатовский институт».

Список литературы

1. **Ковальчук М. В., Нарайкин О. С., Сергунова К. А., Дьякова Ю. А., Черных А. Н. и др.** Распределенный центр ядерной медицины НИЦ «Курчатовский институт»: история, современное состояние и перспективы развития // Кристаллография. 2022. Т. 5, № 67. С. 801–817.
2. **Bryant P. J.** Basic theory for magnetic measurements // CERN 92-05. Sept., 1992. P. 65–69.

References

1. **Kovalchuk M. V., Naraikin O. S., Sergunova K. A., Dyakova Y. A., Chernykh A. N. et al.** Distributed Center for Nuclear Medicine National Research Center “Kurchatov Institute”: history, current state and development prospects. *Crystallography*, 2022, vol. 5, no. 67, pp. 801–817.
2. **Bryant P. J.** Basic theory for magnetic measurements. *CERN 92-05*, Sept., 1992, pp. 65-69.

Сведения об авторах

Алексей Николаевич Черных, кандидат технических наук

Михаил Сергеевич Булатов, лаборант-исследователь

Дмитрий Алексеевич Жидков, научный сотрудник

Геннадий Иванович Кленов, доктор технических наук

Геннадий Николаевич Кропачев, кандидат физико-математических наук

Тимур Вячеславович Кулевой, доктор технических наук

Владимир Петрович Ларионов, кандидат технических наук

Алексей Леонидович Ситников, кандидат физико-математических наук

Information about the Authors

Aleksey N. Chernykh, PhD (Technical Sciences)

Mikhail S. Bulatov, Laboratory Researcher

Dmitry A. Zhidkov, Researcher

Gennady I. Klenov, Doctor of Technical Sciences

Gennady N. Kropachev, Leading Researcher

Timur V. Kulevoy, Doctor of Technical Sciences

Vladimir P. Larionov, Candidate of Technical Sciences

Alexey L. Sitnikov, Candidate of Physics and Mathematics Science

*Статья поступила в редакцию 20.09.2023;
одобрена после рецензирования 20.11.2023; принята к публикации 22.11.2023*

*The article was submitted 20.09.2023;
approved after reviewing 20.11.2023; accepted for publication 22.11.2023*

Научная статья

УДК 681.518.3, 681.5.08, 681.518.5

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-23-33

Аппаратура и программное обеспечение системы управления каналом «бустер – нуклотрон» комплекса НИКА*

**Никита Сергеевич Щегольков, Антон Владимирович Павленко
Андрей Николаевич Журавлев, Андрей Александрович Крылов
Александр Александрович Морсин, Дмитрий Валентинович Сеньков
Александр Алексеевич Жариков**

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

N.S.Schegolkov@inp.nsk.su

Аннотация

В ИЯФ СО РАН была разработана, изготовлена и запущена в ОИЯИ система перевода пучка из бустера в нуклотрон комплекса НИКА. В статье рассматривается аппаратура подсистем контроля и управления, а также описываются принципы и состав комплекта программного обеспечения на основе платформы Tango, предназначенного для выполнения инженерных манипуляций с отдельными элементами и пригодного для работы во время ускорительных сеансов.

Ключевые слова:

система управления, электрофизическая установка, автоматизация, Tango

Для цитирования

Щегольков Н. С., Павленко А. В., Журавлев А. Н., Крылов А. А., Морсин А. А., Сеньков Д. В., Жариков А. А. Аппаратура и программное обеспечение системы управления каналом «бустер – нуклотрон» комплекса НИКА // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 1. С. 23–33. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-23-33

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

Hardware and Software of the Booster Nuclotron Channel Control System of the NIKA Complex

Nikita S. Shchegolkov, Anton V. Pavlenko, Andrey N. Zhuravlev,
Andrey A. Krylov, Alexander A. Morsin, Dmitry V. Senkov,
Alexander A. Zharikov

Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation
N.S.Schegolkov@inp.nsk.su

Abstract

At the BINP, the development, production and launch at JINR of a system for transferring a beam from the Booster to the Nuclotron of the NIKA complex was completed. The article discusses the equipment of monitoring and control subsystems, as well as describes the principles and composition of a software package based on the TANGO platform, designed to perform engineering manipulations with individual elements and suitable for work during acceleration sessions.

Keywords:

control system, electrophysical installation, automation, Tango

For citation

Shchegolkov N. S., Pavlenko A. V., Zhuravlev A. N., Krylov A. A., Morsin A. A., Senkov D. V., Zharikov A. A. Hardware and software of the Booster Nuclotron channel control system of the NIKA complex. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 1, pp. 23–33 (in Russ). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-23-33

Введение

Система перевода пучка из бустера в нуклотрон включает в себя вывод пучка из бустера и канал перепуска частиц из бустера в нуклотрон. В состав последнего входит станция обдирки ионов до необходимого зарядового состояния и канал вывода ионов с нецелевым зарядовым состоянием [1]. Структура канала показаны на рис. 1. Элементами канала являются: BC1–BC5 – дипольные магниты; QC1–QC8 – квадрупольные линзы; SEPT_1,2 – септум-магнит для вывода пучка из бустера; SEPT_3 – септум-магнит для вывода пучка ионов с нецелевым зарядовым состоянием; FOIL – станция обдирки; Absorber – поглотитель ионов с нецелевым зарядовым состоянием; CORR1-3 – отдельно стоящие корректоры; BPM_PUMP – датчики положения пучка (вакуумные насосы); BPM – отдельно стоящие датчики положения пучка; PUMP – отдельно стоящие насосы. Транспортировка частиц происходит по сложной траектории между ускорительными кольцами, находящимися на разных уровнях по высоте. Магнитные элементы канала работают в импульсном режиме. Период работы составляет 4 с и соответствует циклу бустера. Длительность инжектируемого пучка не более 1 мкс.

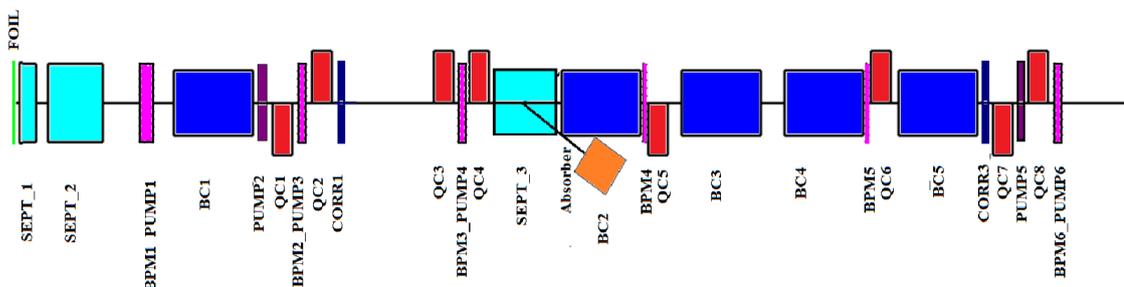


Рис. 1. Структура канала и его топология
Fig. 1. Channel structure and topology

Общее описание системы управления

Структура системы управления представлена на рис. 2.

Система включает элементы управления источниками питания, аппаратуру синхронизации и контроля параметров импульсных сигналов, а также диагностику пучка. Контроль вакуума, блокировки и другие технологические подсистемы интегрированы в уже существующие на комплексе. Аппаратура системы синхронизации и измерительная электроника выполнена в формате VME и располагается в соответствующем крейте. Контроллер крейта подключается к локальной сети комплекса. Контроллеры источников питания встроены в источники, а оборудования для диагностики пучка представляют собой отдельно стоящие модули, также подключаемые через Ethernet.

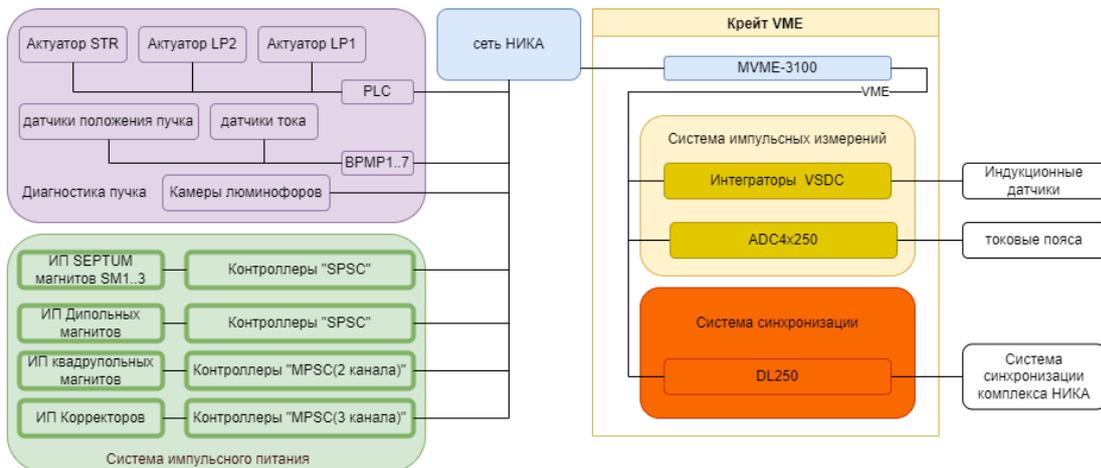


Рис. 2. Структура системы управления каналом
Fig. 2. Channel control system structure

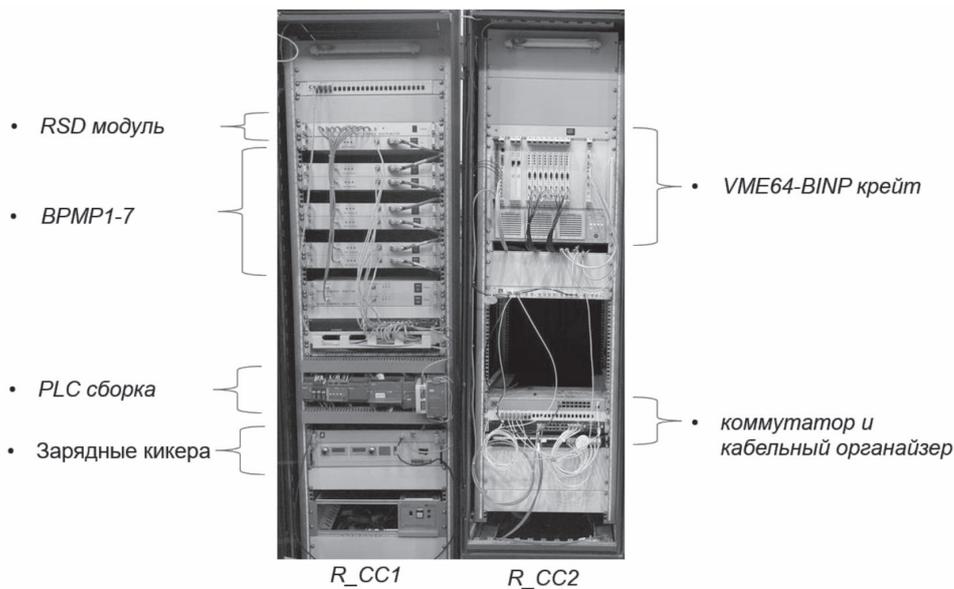


Рис. 3. Фотография шкафов R_CC1 и R_CC2
Fig. 3. Photo of cabinets R_CC1 and R_CC2

Значительная часть аппаратуры системы управления каналом сконцентрирована в двух шкафах, обозначенных как R_CC1 и R_CC2, их фотография представлена на рис. 3. В шкафу R_CC1 располагаются 7 модулей ВРМР1-7 и два модуля DQ1-2, которые обрабатывают сигналы с датчиков положения и тока пучка. Блок RSD в свою очередь занимается распределением сигналов синхронизации для блоков ВРМР и DQ. Сигналы от люминофорных станций и станции обдирки подключаются к комплекту оборудования на основе программируемого логического контроллера, обозначенного как PLC-сборка. Еще ниже располагается зарядное устройство генератора ударных магнитов и контроллер для него. В самом низу – контроллер шагового двигателя станции обдирки. В шкаф R_CC2 установлено коммутационное оборудование сети Ethernet и глобальной системы синхронизации комплекса, а также крейт VME64-BINP, содержащий электронику для систем мониторинга импульсных сигналов и синхронизации канала.

Управление системой импульсного питания

Система питания дипольных, квадрупольных, корректирующих и септум-магнитов включает 22 импульсных источников, для управления которыми используются контроллеры двух типов: одноканальным SPSC и многоканальным MPSC. В таблице представлен список типов импульсных магнитов транспортного канала, их основные параметры, включая длительность импульса, и указаны типы используемых контроллеров. Контроллеры SPSC работают совместно с источниками питания дипольных и септум-магнитов. Контроллер MPSC является четырехканальным устройством, однако в источниках питания квадрупольных линз задействованы два, а в источниках питания корректоров – три канала этого контроллера.

Классификация магнитных элементов по их типам и типы контроллеров источников питания

Classification of magnetic elements by their types and types of power supply controllers

Условное обозначение	Номинальное поле, Т	Время нарастания до максимума, мс	Тип контроллера	Колчество
SEPT_1	0,5	0,04	Одноканальный SPSC	1
SEPT_2, SEPT_3	1,35	0,6	Одноканальный SPSC	2
BC1–BC5	1,6	10,5	Одноканальный SPSC	5
CORR1–CORR3		15	Трехканальный MPSC	2
	Градиент, Т/м			
QC1–QC4	до 7,4	7,3	Двухканальный MPSC	2
QC5–QC8	до 13	7,3	Двухканальный MPSC	2

С точки зрения управления контроллеры схожи, взаимодействие с ними осуществляется удаленно по протоколу Modbus/TCP. С помощью регистров контроллера устанавливается уровень заряда конденсаторных накопителей, задаются значения иных внутренних параметров, считываются данные об измеренном напряжении батарей, данные о состоянии блокировок, а также осциллограммы выходных тока и напряжения для сгенерированного импульса. Оба типа контроллеров получают сигналы от системы синхронизации.

Структура питания ударного магнитов выпуска из бустера изображена на рис. 4.

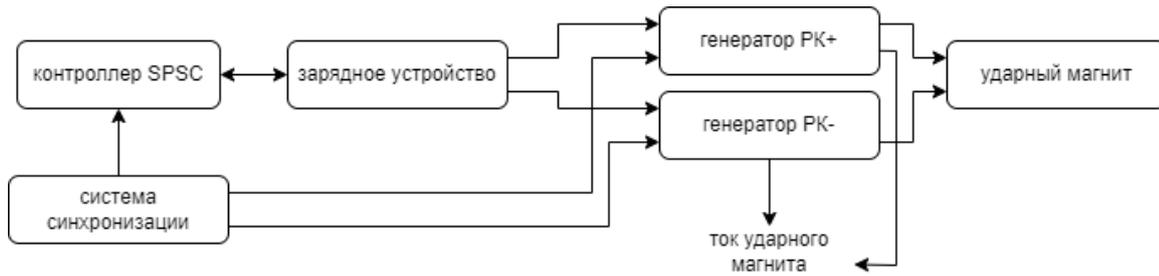


Рис. 4. Структурная схема системы питания выпускного ударного магнита
 Fig. 4. Block diagram of the power supply system for the exhaust impact magnet

Поле в выпускном ударном магните [2] формируется с помощью двух импульсных генераторов, расположенных в газонаполненных баках. Каждый импульсный генератор содержит накопитель энергии на основе формирующей линии и коммутатор. Зарядное устройство этих генераторов марки Spellman SL60PN1200 установлено в шкаф R_CC1, а блок его управления сделан на основе контроллера SPSC, имеющего модифицированную карту регистров. Выходы генераторов оснащены поясами Роговского, сигнал с которых нормируется с помощью согласованных делителей и передается коаксиальными кабелями на вход осциллографического модуля в шкаф R_CC2.

Контроль параметров импульсных элементов

Поворотные импульсные магниты и квадрупольные линзы оснащены встроенными индукционными датчиками, представляющими собой катушку, выполненную на многослойной печатной плате, снабженную электростатическим экраном на внешних слоях. Система обеспечивает установку требуемой величины поля при настройке режима транспортировки частиц, а также контроль стабильности поля, для чего содержит 16 измерительных каналов. Измерение импульсного магнитного поля основано на интегрировании сигнала индукционных датчиков при помощи цифровых интеграторов VsDC3. Принцип действия VsDC3 описан в [3], а пример использования для реализации импульсных измерений представлен в [4]. Каждый магнит имеет основной и запасной индукционный датчик. Цифровые интеграторы VsDC3 обладают разрешающей способностью лучше, чем 10^{-4} . Для их функционирования требуется подать на каждый канал синхроимпульсы: старта и остановки интегрирования. Старт интегрирования производится незадолго до срабатывания импульсного источника, а остановка должна быть привязана к моменту пролета пучка.

Выходной ток генераторов, питающих ударный магнит, контролируется с помощью поясов Роговского, оцифровываемых осциллографическим модулем ADC4X250-4CH, который расположен в крейте VME64-BINP. Этот модуль содержит четыре канала с частотой дискретизации 250 Мвыб/с по каждому из каналов, разрядностью 12 бит и полосой сигнального тракта около 80 МГц. Подробнее модуль ADC4X250-4CH описан в [5]. Осциллограммы тока используются для настройки времени срабатывания пары генераторов относительно друг друга, а также для контроля амплитуды и стабильности тока на выходе генераторов.

Оборудование для диагностика пучка

Системы диагностики пучка в канале транспортировки содержат два широкополосных датчика тока (DQ1, DQ2), семь электростатических четырехэлектродных датчиков положения пучка (BPM1 – BPM7) и три люминофорные станции. Схема обработки сигналов от датчиков

тока и датчиков положения пучка представлена на рис. 5. Она включает в себя располагаемые рядом с датчиками предусилители, а также находящиеся в радиостойках блоки электроники.

Предусилитель сигналов от датчиков положения пучка оснащен входом калибровки, сигнал которой формируется блоком ВРМР. Измеритель тока пучка обладает погрешностью менее 3 % при максимально допустимом импульсном токе 400 мА. Погрешность определения положения пучка не превышает 0,2 мм в области 50 % от апертуры датчиков.

Для функционирования блоков обработки сигналов требуется один сигнал старта, подаваемый незадолго до пролета пучка. Взаимодействие с системой управления осуществляется через Ethernet посредством UDP-серверов, работающих в каждом блоке ВРМ и DQ и имеющих специализированную систему команд.

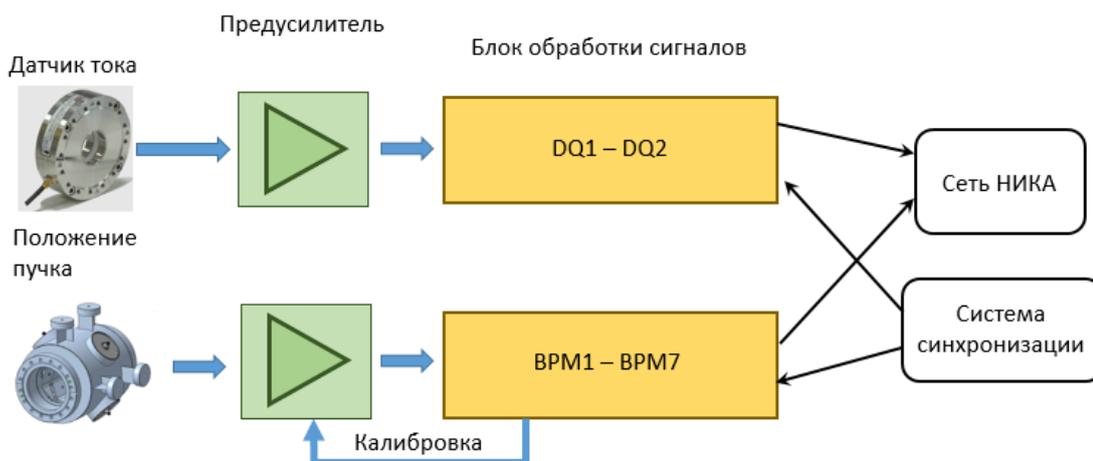


Рис. 5. Схема обработки сигналов тока и положения пучка
Fig. 5. Scheme for processing signals of current and beam position

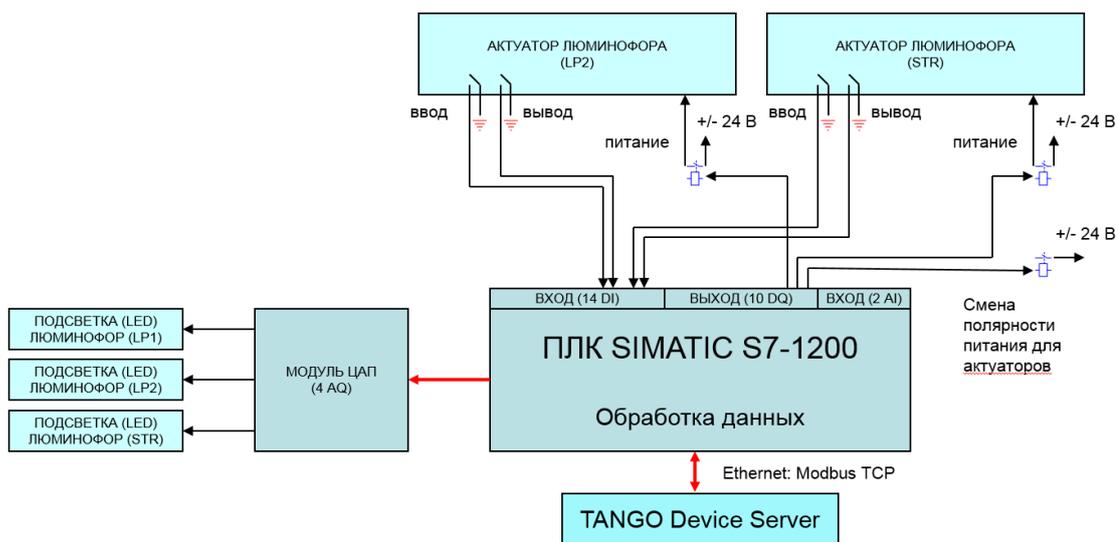


Рис. 6. Структурная схема PLC-сборки для управления люминофорными станциями
Fig. 6. Block diagram of a PLC assembly for controlling phosphor stations

Рассмотрим организацию работы с люминофорными станциями (LP1, LP2 и STR). Для управления двумя из них используется сборка на основе программируемых логических контроллеров (PLC) фирмы Siemens. Структура этой сборки представлена на рис. 6. Ввод и вывод люминофорных датчиков LP2 и STR осуществляется подачей питающего напряжения на актуаторы в прямой или обратной полярности. Граничные положения люминофора определяются с помощью концевых датчиков. Питание актуаторов, сигналы от датчиков концевых положений и подсветка люминофорных экранов подключаются к модулям в сборке PLC. Взаимодействие с системой управления осуществляется через Ethernet по протоколу Modbus/TCP. Изображение пучка регистрируется с помощью ПЗС-камеры, оснащенной входом синхронизации и стандартным интерфейсом сетевого доступа GigE Vision.

Структура системы синхронизации

Система синхронизации канала транспортировки частиц организует полный набор синхросигналов для всего оборудования канала, привязанных к рабочему циклу бустера и предусматривает возможность автономной работы канала для нужд пусконаладочных или профилактических работ. Структура системы синхронизации показана на рис. 7 и содержит следующие элементы.

1. Модуль ввода сигналов синхронизации.
2. VME крейт со специализированной магистралью в формате VME64 BINP.
3. Пара цифровых линий задержки DL250VME и формирователей сигналов DL250RIO.

Импульсы от глобальной системы синхронизации поступают на вход блока ввода сигналов синхронизации, расположенного в позиции 2 крейта, выполненного в формате VME64 – BINP. Крейт VME64 – BINP обладает возможностями для организации межмодульной синхронизации [6].

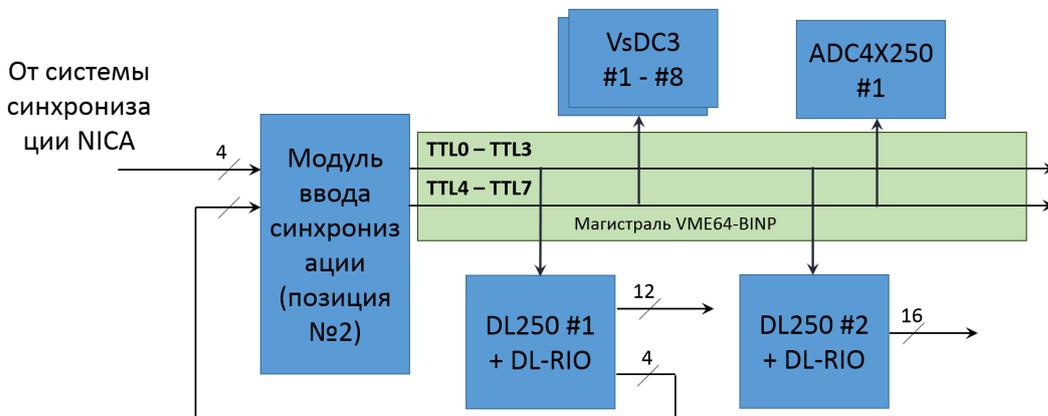


Рис. 7. Организация системы синхронизации элементов канала
Fig. 7. Organization of a synchronization system for channel elements

На рис. 8 представлена временная диаграмма срабатывания элементов канала. От глобальной системы синхронизации комплекса поступает три сигнала: два предварительных запуска за 20 и 1 мс до пролета пучка и сигнал на старт перепуска. Эти сигналы запускают отдельные каналы двух цифровых линий задержки DL250VME, которые через формирователи сигналов DL250-RIO генерируют 21 задержанный импульс для синхронизации срабатывания источников питания и оборудования диагностики пучка с пролетом пучка. Функционирование и возможности модулей DL250VME и DL250-RIO представлены в [6].

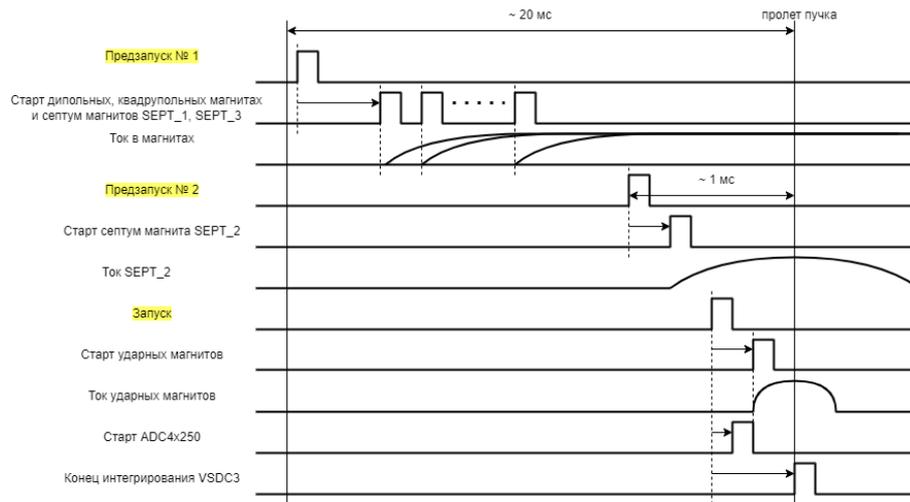


Рис. 8. Временная диаграмма работы канала
 Fig. 8. Time diagram of channel operation

Четыре выхода одного из DL250VME подключены обратно на входы модуля ввода синхросигналов, создавая на магистрали крейта дополнительные сигналы с регулируемой задержкой. Таким образом, организован старт и остановка цифровых интеграторов VsDC3, старт осциллографического модуля ADC4X250-4CH, а также реализована возможность автономной синхронизации канала транспортировки.

Программное обеспечение Аппаратно-серверная инфраструктура

Система управления комплексом НИКА построена на основе программного каркаса Tango, что определило базу разрабатываемого программного обеспечения для канала перепуска. Платформа Tango реализует концепцию клиент-серверного взаимодействия. Серверную часть программного комплекса реализует доступ к оборудованию, она разделена на несколько уровней:

- 1) нижний уровень шины;
- 2) логический уровень устройства;
- 3) серверный уровень взаимодействия с Tango.

Взаимосвязь между уровнями демонстрируется на рис. 9.

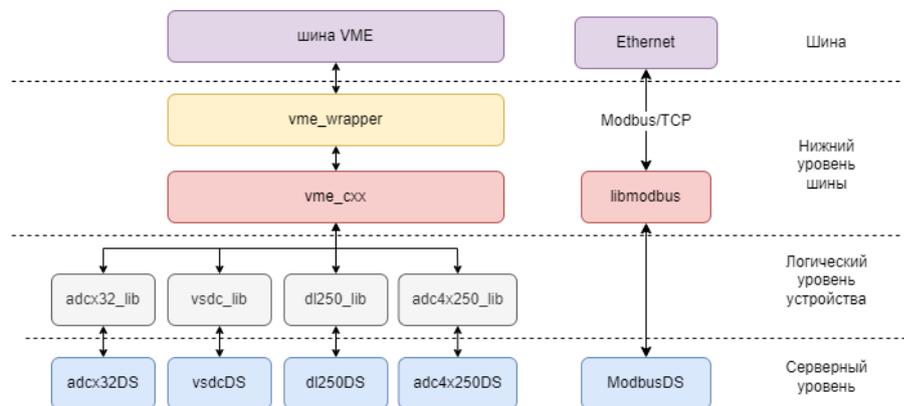


Рис. 9. Схема архитектуры программного обеспечения серверного уровня
 Fig. 9. Server-level software architecture diagram

Управление, настройка и чтение данных из модулей осуществляется через конфигурационные регистры и память, доступ к которым открыт по шине VME или протоколу Modbus/TCP. Для работы с ними сделан первый уровень программного обеспечения, включающий набор библиотек для шины VME и реализации протокола Modbus/TCP. Работа с шиной VME разбита на два модуля: библиотеку `vme_wrapper` на языке C для непосредственного взаимодействия с драйвером шины и `vme_sxx` как интерфейс на языке C++. Работа протокола Modbus реализована через открытую библиотеку `libmodbus`.

Второй уровень включает библиотеки, реализующие бизнес-логику, а именно: сбор и предварительную обработку данных и переключение между логическими режимами работы устройств. Для устройств на шине VME этот уровень включает 4 библиотеки, каждая из которых соответствует определенному устройству. Для модулей Modbus/TCP данный уровень не используется.

Третий уровень представлен серверами Tango, которые подключают устройства к общей системе управления, предоставляя управления удаленному пользователю.

Сервер Modbus-Tango

В число устройств, управляемых по протоколу Modbus/TCP, входят два типа контролеров источников питания (SPSC и MPSC) и PLC сборка. Четырехканальные контроллеры MPSC используются в двух вариациях: как двухканальный для источников питания квадрупольных линз и трехканальный для источников питания корректоров. Для обеспечения управления таким набором устройств был разработан гибкий Tango-сервер для всех Modbus-устройств. Стандарт Modbus строго определен, это позволило реализовать конфигурируемый Tango-сервер, атрибуты которого динамически генерируются в процессе инициализации сервера. Конфигурация, описывающая карту регистров устройства, представлена в качестве свойства девайс-сервера в базе данных Tango. Для работы и с контроллерами импульсных источников питания реализована поддержка битов готовности. После запуска источника питания, как только контроллер выполнит измерение осциллографических данных, бит готовности переходит в состояние логической единицы. Опрашивая этот бит, сервер обнаруживает готовность нового измерения, выполняет сброс бита готовности и чтение осциллографических данных.

Клиентские приложения

Инженерные клиентские приложения с графическим интерфейсом создаются в первую очередь для разработчиков с целью проверки работоспособности устройств, а также систем на их основе. Это подразумевает необходимость предоставления через клиентские приложения доступа абсолютно ко всем имеющимся в устройствах настройкам и данным. Для того чтобы разработанные инженерные приложения оказались пригодны для работы с каналом во время сеансов работы с пучком, учитывая количество отображаемых атрибутов, было решено применить табличное представление. На рис. 10 представлено приложение для работы с контроллерами источников питания поворотных и септум-магнитов. Каждая строка таблицы относится к отдельному устройству, столбец отвечает за атрибут какого-либо типа. Атрибуты разбиты на подгруппы и скомпонованы в отдельных вкладках таблицы. На центральной вкладке находятся наиболее востребованные с точки зрения оператора атрибуты, а именно: состояние источника, флаги разрешения работы, задание напряжения накопителей. Таблицы поддерживают множественное редактирование через выделение нескольких ячеек и занесение всем ячейкам необходимого значения за одно действие.

Клиентские приложения используют унифицировать кодовую базу и конфигурационные файлы, в которых хранятся настройки, включающие соответствие между Tango-атрибутом и способом его отображения.

The screenshot shows a window titled 'septum' with a 'choose devices' dropdown. Below it are tabs for 'Parameters', 'Graph', and 'Integral Graph'. The 'Parameters' tab is active, displaying a table with columns: Control, Status, Interlocks, and Advanced. The 'Advanced' sub-tab is selected, showing a table with columns: State, PowerON, EnableCharging, Vset, запуск, ClearInterlocks, and ClearStartedFlag. The table contains 9 rows of device data.

Control	Status	Interlocks	Advanced	State	PowerON	EnableCharging	Vset	запуск	ClearInterlocks	ClearStartedFlag
bnc/ps/bm1	ON			ON	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
bnc/ps/bm2	ON			ON	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
bnc/ps/bm3	ON			ON	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
bnc/ps/bm4	ON			ON	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
bnc/ps/bm5	ON			ON	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
bnc/ps/sm1	ON			ON	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
bnc/ps/sm2	ON			ON	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
bnc/ps/sm3	ON			ON	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Рис. 10. Пример табличного инженерного приложения
 Fig. 10. Example of a spreadsheet engineering application

Заключение

Для системы перевода пучка «бустер – нуклотрон» были разработаны, изготовлены и введены в эксплуатацию аппаратура и программное обеспечение, обеспечившие успешный запуск и последующую работу канала. Были реализованы подсистемы внутренней синхронизации элементов канала, системы диагностики и управления пучка. В ходе работы оптимизированы методы разработки программного обеспечения, что значительно улучшило и упростило программный комплекс управления.

Список литературы

1. **Tuzikov A., et al.** Beam transfer systems of NICA facility: from HILAC to Booster // *Proceedings of RuPAC 2021*, 2021.
2. **Анчугов О. В. и др.** Ударный магнит для вывода пучка из бустера в канал «бустер – нуклотрон» комплекса NICA // *Приборы и техника эксперимента*. 2022. № 3. С. 100–107.
3. **Batnikov A. M., Pavlenko A. V.** Precise digital integration in wide time range: theory and realization // *JINST*. 2017. Vol. 12. P. P07012.
4. **Batnikov A., Ilyin I., Pavlenko A.** Electronics for precise measurements of accelerator pulsed magnets // *Proceedings of IPAC2013*. Shanghai China, 2013. P. 3216.
5. **Kotov E. S., et al.** VME-based digitizers for waveform monitoring system of linear induction accelerator LIA 20 // *Proceedings of ICALEPCS2017*. Barcelona, Spain, 2017. P. 1291–1293.
6. **Fatkin G., et al.** New VME-based hardware for automation in BINP // *Proceedings of ICALEPCS2017*. Barcelona, Spain, 2017. P. 1294–1297.

References

1. **Tuzikov A., et al.** Beam transfer systems of NICA facility: from HILAC to Booster. *Proceedings of RuPAC 2021*, 2021.
2. **Anchugov O. V., et al.** Impact magnet for extracting a beam from a booster into the booster-nuclotron channel of the NICA complex. *Instruments and experimental technique*, 2022, № 3, pp. 100–107. (in Russ.)
3. **Batnikov A. M., Pavlenko A. V.** Precise digital integration in wide time range: theory and realization. *JINST*, 2017, vol. 12, pp. P07012.

4. **Batrakov A., Ilyin I., Pavlenko A.** Electronics for precise measurements of accelerator pulsed magnets. *Proceedings of IPAC2013*. Shanghai China, 2013, p. 3216.
5. **Kotov E. S., et al.** VME-based digitizers for waveform monitoring system of linear induction accelerator LIA 20. *Proceedings of ICALEPCS2017*. Barcelona, Spain, 2017, pp. 1291–1293.
6. **Fatkin G., et al.** New VME-based hardware for automation in BINP. *Proceedings of ICALEPCS2017*. Barcelona, Spain, 2017, pp. 1294–1297.

Сведения об авторах

Щегольков Никита Сергеевич, инженер-исследователь
Павленко Антон Владимирович, кандидат технических наук
Журавлев Андрей Николаевич, кандидат физико-математических наук
Крылов Андрей Александрович, научный сотрудник
Морсин Александр Александрович, младший научный сотрудник
Сеньков Дмитрий Валентинович, кандидат технических наук
Жариков Александр Алексеевич, ведущий инженер-электроник

Information about the Authors

Nikita S. Shchegolkov, Research Engineer
Anton V. Pavlenko, Ph.D.
Andrey N. Zhuravlev, Ph.D.
Andrey A. Krylov, Researcher
Alexander A. Morsin, Junior Researcher
Dmitry V. Senkov, Ph.D.
Alexander A. Zharikov, Lead Electronics Engineer

*Статья поступила в редакцию 07.11.2023;
одобрена после рецензирования 01.12.2023; принята к публикации 24.01.2024*
*The article was submitted 07.11.2023;
approved after reviewing 01.12.2023; accepted for publication 24.01.2024*

Научная статья

УДК 621.384.6

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-34-42

Регулировка выходной энергии в течение ВЧ-импульса в линейном ускорителе протонов для медицины*

Любовь Юрьевна Овчинникова¹, Александр Павлович Дуркин²
Александр Сергеевич Курилик³, Валентин Витальевич Парамонов⁴

¹⁻⁴Институт ядерных исследований РАН
Москва, Россия

¹АО "НИИ "Феррит-Домен"
Санкт-Петербург, Россия

¹lubovch@inr.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7382-2705>

²durkinap@inr.ru

³a.s.kurilik@yandex.ru

⁴paramono@inr.ru

Аннотация

В протонной терапии сканирование объекта облучения по глубине производится изменением выходной энергии (ВЭ) ускоренного пучка. В импульсных линейных ускорителях принята регулировка ВЭ за счет изменения амплитуды и/или фазы поля в ускоряющих элементах от одного СВЧ-импульса к другому. Применение являющихся безынерционными ускоряющих секций на бегущей волне позволяет быстрее изменять фазу ускоряющего поля в течение ВЧ-импульса. Фаза и амплитуда поля в секции определяется как фазой и амплитудой входного СВЧ-сигнала, так и процессом его распространения в дисперсной структуре. Результаты расчета распространения бегущей волны в ускоряющей структуре при изменении фазы СВЧ-сигнала и результаты моделирования динамики частиц подтверждают изменение ВЭ-ускорителя в процессе СВЧ-импульса. Предлагаемая методика регулировки ВЭ позволяет многократно повысить скорость сканирования объекта облучения по глубине.

Ключевые слова

протонная терапия, линейный ускоритель на бегущей волне

Для цитирования

Овчинникова Л. Ю., Дуркин А. П., Курилик А. С., Парамонов В. В. Регулировка выходной энергии в течение ВЧ-импульса в линейном ускорителе протонов для медицины // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 1. С. 34–42. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-34-42

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

© Овчинникова Л. Ю., Дуркин А. П., Курилик А. С., Парамонов В. В., 2024

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2024. Том 19, № 1

Siberian Journal of Physics, 2024, vol. 19, no. 1

Output Energy Regulation During RF Pulse in Proton Linac for Medicine

Liubov Yu. Ovchinnikova¹, Alexander P. Durkin²
Alexander S. Kurilik³, Valentin V. Paramonov⁴

¹Ferrite Domen Co.,
St. Petersburg, Russian Federation

¹⁻⁴INR RAS
Moscow, Russian Federation

¹lubovch@inr.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7382-2705>

²durkinap@inr.ru

³a.s.kurilik@yandex.ru

⁴paramono@inr.ru

Abstract

In proton therapy, depth scanning of the irradiated object is performed by changing the Output Energy (OE) of the accelerated beam. In pulsed linear accelerators, adjustment of the OE is usually by changing the amplitude and/or phase of the field in the accelerating elements from one RF pulse to another. The application of non-inertial traveling wave accelerating sections makes it possible to change quickly the phase of the accelerating field during the RF pulse. The phase of the field in the constant gradient section is determined both by the phase of the input RF signal and by the process of wave propagation in the dispersive structure. The calculation results of the traveling wave propagation in the accelerating structure when the phase of the input RF signal changes and the results of simulation the dynamics of particles confirm the change in the linac's OE during the RF pulse. The proposed method for regulation the OE makes it possible to increase in orders the speed of scanning the irradiated object by depth.

Keywords

proton therapy, traveling-wave linear accelerator

For citation

Ovchinnikovs L. Yu., Durkin A. P., Kurilik A. S., Paramonov V. V. Output Energy Regulation During RF Pulse in Proton Linac for Medicine. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 1, pp. 34–42 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-34-42

Введение

Предложение разрабатываемого импульсного линейного ускорителя (ЛУ) протонов с выходной энергией частиц до 230 МэВ изложено в [1]. Ускоряющими элементами в основной части ЛУ являются секции структуры на бегущей волне (Traveling Wave – TW) с постоянным градиентом. Регулировка ВЭ ЛУ, необходимая для сканирования объекта по глубине, за счет изменения амплитуды ускоряющего поля ведет к необходимости управлять параметрами мощного высоковольтного оборудования. Это возможно от одного СВЧ-импульса к другому, но технически не реализовано в течение одного короткого ВЧ-импульса длительностью не более десятков мкс.

Изменение фазы ВЧ-поля можно производить на низком уровне СВЧ-мощности. Моделирование выходного СВЧ-импульса клистрона КИУ-286¹, рассматриваемого для ЛУ, при скачкообразном изменении фазы входного сигнала показало в выходном сигнале отслеживание изменения с незначительным переходным процессом длительностью ~0,3 мкс.

В ускоряющей структуре на стоячей волне изменение амплитуды или фазы поля происходит за время $\sim 3\tau$, где τ – постоянная времени резонатора. Для структур S частотного диапазона $\sim 3\tau \approx 4,5$ мкс, что практически определяет возможность изменения ВЭ только от одного СВЧ-импульса к другому.

В отличие от резонаторов, TW-структура является безынерционной. Принцип регулирования ВЭ-пучка в TW-структуре при скачкообразном изменении фазы входного СВЧ-импульса сформулирован в работе [2]. Используется возможность иметь в TW-структуре на различных

¹ АО «НПП «Торий», <https://www.toriy.ru>

участках СВЧ-поля с одинаковой амплитудой, но разными фазами колебаний. Граница раздела между участками перемещается вдоль структуры с групповой скоростью волны. При этом обеспечивается плавное и быстрое изменение ВЭ.

Характерным масштабом времени процесса регулировки становится время заполнения ТВ-структуры. Для разрабатываемого ЛУ это ~ 1 мкс. Возможность дискретного изменения фазы входного СВЧ-сигнала на небольшую величину на низком уровне СВЧ-мощности за такой промежуток времени доказана результатами работы [3].

В данной работе прямым численным моделированием движения протонов в СВЧ-поле распространяющейся вдоль ТВ-структуры составной волны подтверждена возможность быстрого изменения ВЭ ЛУ в течение СВЧ-импульса и определены особенности и количественные характеристики выходного пучка. Приведены особенности поля дозы облучения при таком способе регулировки ВЭ ЛУ.

Исследование проведено на примере регулировки СВЧ-поля в выходной, 12-й ТВ-структуре ЛУ.

Моделирование распространения СВЧ-сигнала в ТВ-структуре

Методика и основные результаты моделирования распространения СВЧ-импульса в дисперсной ТВ-структуре с постоянным градиентом описана в работе [4]. Рассматриваемая ТВ-структура работает на волне вида $2\pi/3$, содержит 102 ячейки и имеет отрицательную дисперсию [2]. Устройство ввода СВЧ-мощности (УВМ) располагается в последней 102-й ячейке и СВЧ-волна движется навстречу пучку. Структура рассчитана на ускорение протонов от 200 до 230 МэВ. На вход в УВМ подается СВЧ-сигнал, фаза которого меняется скачкообразно на 8° каждую 1 мкс, общая длительность моделируемого процесса 7 мкс. Поле в структуре можно описать соотношением

$$E = E_0 \cos(\omega t + \varphi_r(n, t)), \quad (1)$$

где E_0 – амплитуда ускоряющего поля; $\varphi_r(n, t)$ – изменяющаяся во времени для каждой ячейки с номером n фаза, описывающая распространение волны от УВМ.

На рис. 1 для трех ячеек иллюстрируется процесс распространения волны в дисперсной ТВ-структуре. Серый фон на рисунках соответствует амплитуде поля E_0 , а черные линии – эффективной напряженности поля (1) для выбранных ячеек, обусловленной скачкообразным изменением фазы на входе в УВМ.

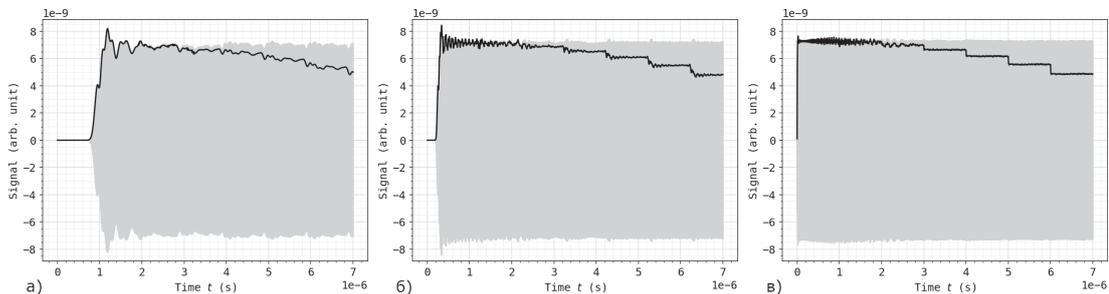


Рис. 1. Эффективная напряженность поля в ячейке 1 – вход пучка (а), в ячейке 51 (б) и в ячейке 102 – с УВМ (в)

Fig. 1. Effective field strength in cell 1 – beam input (a), in cell 51 (b) and in cell 102 with RF Power Input (c)

Из приведенных рисунков видно, что первоначально скачкообразный фронт распространения изменения фазы вблизи ячейки с УВМ (рис. 1, в), расплывается при распространении по структуре (рис. 1, б). При этом амплитуда поля не меняется. А рис. 1, а подтверждает ожидаемое время заполнения структуры – фронт изменения фазы доходит до первой ячейки после первой микросекунды. Это подтверждается и обобщенной двумерной диаграммой на рис. 2. Для обеспечения постоянства ускоряющего градиента групповая скорость изменяется по длине структуры, и в левой части рис. 2 отчетливо видна нелинейная зависимость времени прихода фронта изменения фазы от номера ячейки.

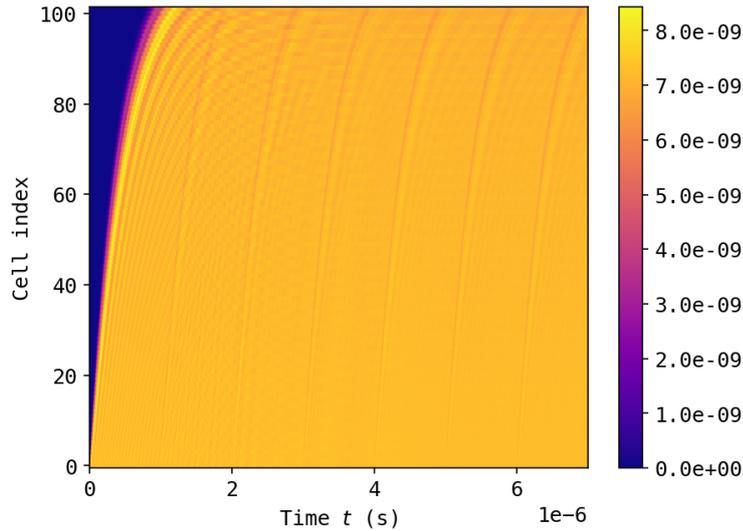


Рис. 2. Напряженность поля в ячейках. По горизонтальной оси – время, по вертикальной – номер ячейки. 0 соответствует ячейке с УВМ. Цветом показана амплитуда напряженности поля
 Fig. 2. Field strength in cells. On horizontal axis is time, on vertical axis is cell number. 0 corresponds to cell with RF Power Input. The color shows amplitude of field strength

Приведенные на рис. 1 и 2 зависимости полностью соответствуют физическим представлениям о распространении узкополосного сигнала в дисперсной структуре.

Динамика протонного пучка в СВЧ-импульсе протонного ускорителя

Движение протонов в ускоряющем СВЧ-поле описывается уравнениями (2):

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{dz} = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{1}{\beta} - \frac{1}{\beta_c} \right] \\ \frac{d\beta}{dz} = \frac{eE_0 \cos(\varphi + \varphi_s + \varphi_r(n, t'))}{W_0 \beta \gamma^3} \end{cases} \quad (2)$$

где λ , β_c , – длина и относительная фазовая скорость волны в ячейке; W_0 – энергия покоя протона; β , γ – относительная скорость и Лоренц-фактор частицы; $\varphi_s = -10^\circ$ – расчетное значение синхронной фазы; $\tau = ct$, $\varphi = \omega\tau/c - 2\pi z/\lambda\beta_c$ – нормированное время и фаза частицы.

Расчетная величина ускоряющего поля E_0 для рассматриваемой структуры равна 14,67 МВ/м. Система (2) решается последовательно от ячейки к ячейке. $\varphi_r(n, t')$, следующая

из результатов расчета распространения волны, однозначно связана с номером ячейки n и временем t' от начала изменения фазы.

Продольные фазовые портреты пучка на входе в структуру [1] и выходе в режиме номинального ускорения, т. е. без изменения фазы СВЧ-сигнала, показаны на рис. 3.

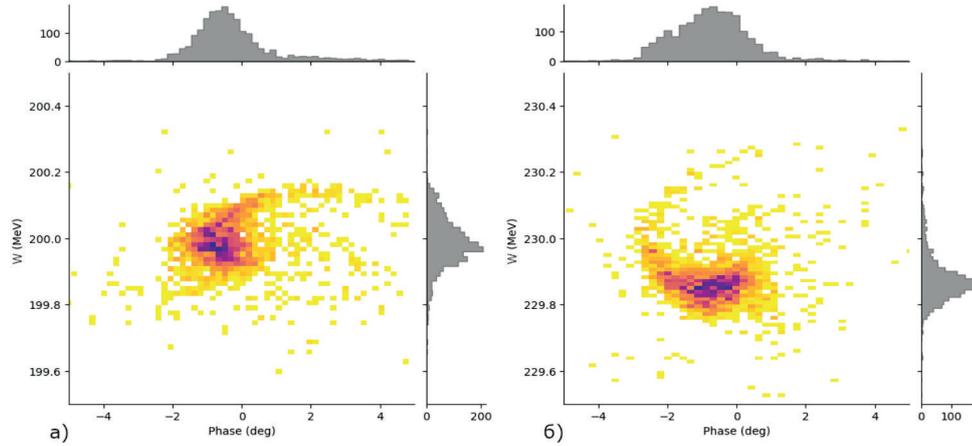


Рис. 3. Продольные фазовые портреты пучка на входе (а) и выходе (б) структуры в режиме номинального ускорения

Fig. 3. Longitudinal phase portraits of beam at input (a) and exit (b) of structure in nominal acceleration mode

Моделирование регулировки энергии пучка проведено решением во времени методом Рунге – Кутты системы уравнений (2) с использованием полученных ранее распределений поля распространяющейся волны.

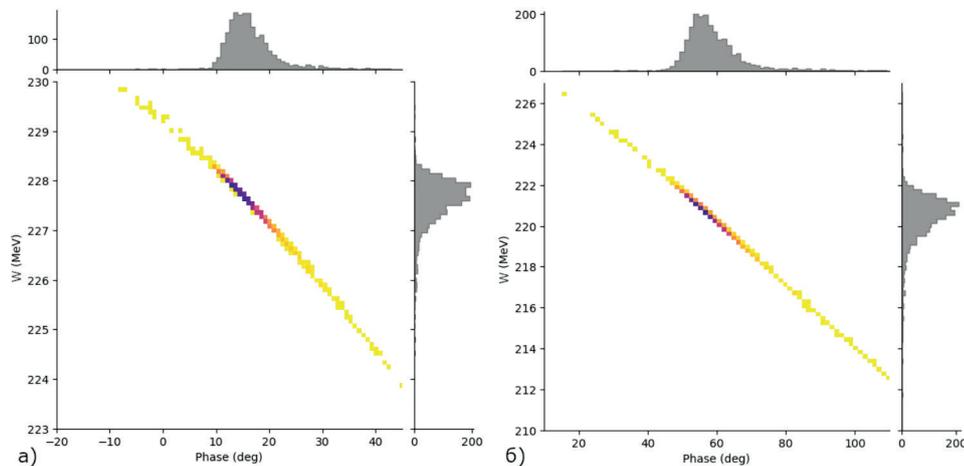


Рис. 4. Продольные фазовые портреты пучка на выходе структуры, при сдвиге фазы СВЧ-поля на входе УВМ на 30° (а) и 40° (б)

Fig. 4. Longitudinal phase portraits of beam at output of structure, with RF field phase shift at RF Power Input by 30° (a) and 40° (b)

Для существенной регулировки ВЭ необходимо нарушить условия устойчивого продольного движения частиц в структуре, т. е. создать условия, когда принцип автофазировки выпол-

няться не может. При этом продольное движение частиц качественно отличается от номинального режима. На рис. 4 показаны продольные фазовые портреты частиц на выходе структуры при значительном изменении фазы СВЧ-сигнала. Следует обратить внимание на различие шкал этих рисунков. В единой шкале на одном из рисунков распределение вырождается в пятно.

При расчетной синхронной фазе структуры -10° для нарушения автофазировки необходимо ввести изменение фазы поля не менее чем $\sim 20^\circ$. Это подтверждается приведенными ниже данными моделирования на рис. 5 и 6 – до 2 мкс выбранного закона изменения фазы поля на входе в УВМ действует режим автофазировки – при изменении фазы поля на 8° и 16° энергия ускоренного пучка существенно не меняется. Начиная с 2,5 мкс виден выход из области устойчивого продольного движения, что соответствует 16° изменения фазы поля, выходная энергия ускоренного пучка начинает меняться.

Как видно из приведенных на рис. 4 распределений, при значительном изменении фазы входного сигнала изменяется не только средняя энергия частиц в сгустке, но и значительно увеличивается разброс частиц по энергии.

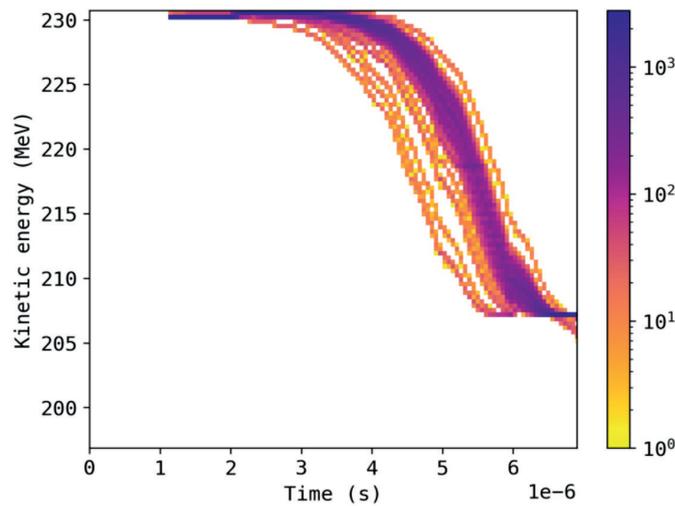


Рис. 5. Распределение количества частиц на выходе ЛУ по времени и энергии
 Fig. 5. Distribution of particles quantity at output of linear accelerator in time and energy

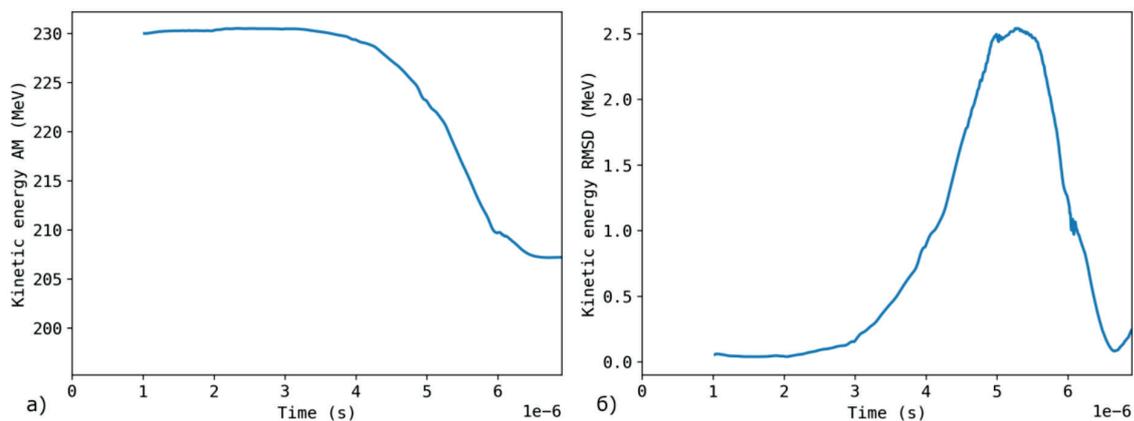


Рис. 6. Зависимости от времени средней энергии пучка (а) и среднеквадратичного разброса энергии частиц в сгустке (б)

Fig. 6. Time dependence of average beam energy (a) and root-mean-square spread of particle energy in bunch (b)

При выбранном законе изменения входной фазы распределение числа частиц по времени и энергии показано на рис. 5.

Графики зависимостей средней энергии частиц в сгустке и среднеквадратичного разброса частиц по энергии для выбранного закона изменения фазы СВЧ-поля приведены на рис. 6.

Полученные результаты моделирования движения протонов в меняющемся в течение СВЧ-импульса поле совпадают и независимо подтверждают, поскольку получены с помощью вновь разработанного специализированного программного обеспечения, полученные ранее в [1] характеристики пучка при изменении фазы поля от одного СВЧ-импульса к другому. Но это следует рассматривать как утверждение, что при реализации изменения фазы в течение СВЧ-импульса будут получены аналогичные параметры пучка, но на несколько порядков быстрее по времени и с более широкими и гибкими возможностями формирования поля облучения.

Дозовые поля, сформированные ускоренными сгустками

С использованием Geant4 [5] было выполнено моделирование распределения поглощенной дозы в воде по глубине от серии ускоренных сгустков (рис. 7).

Рассчитанное с применением Geant4 распределение дозы облучения по глубине от серии ускоренных сгустков, соответствующей временному промежутку регулирования ВЭ от 3 до 6 мкс (см. рис. 5), приведено на рис. 7. Область облучения расположена на глубине от 280 до 320 мм.

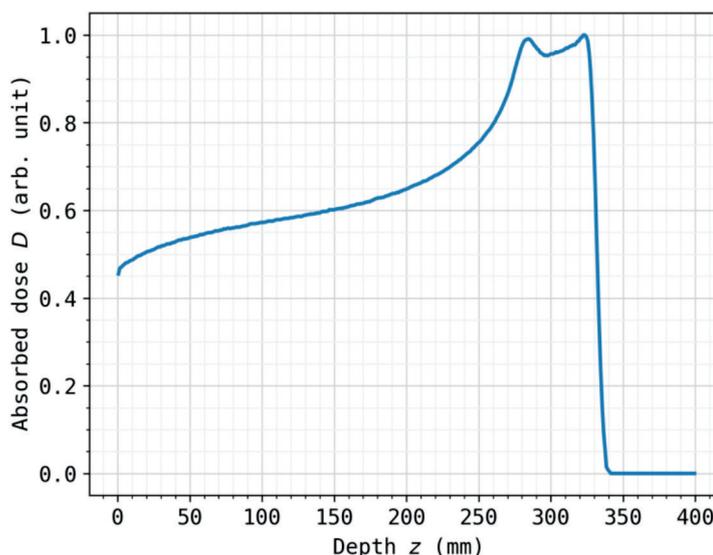


Рис. 7. Распределение поглощенной дозы в воде по глубине
Fig. 7. Distribution of absorbed dose in water by depth

Существуют различия в формировании дозы при регулировке ВЭ в течение СВЧ-импульса от рассмотренного в [6] формирования при регулировке ВЭ от СВЧ-импульса к СВЧ-импульсу.

За время 1 мкс через структуру пролетает 476 сгустков. При регулировке ВЭ от импульса к импульсу все эти сгустки формируют одну достаточно узкую зону [6] с незначительно размытым пиком Брэгга из-за разброса по энергии частиц в сгустке. При регулировке ВЭ в течение импульса все сгустки различаются по средней энергии, и это различие, как можно оценить по графикам на рис. 5 и 6, меньше или соизмеримо с разбросом по энергии частиц в сгустке.

Поэтому размытые разбросом по энергии частиц в сгустке пики Брэгга от соседних сгустков перекрываются. Это позволяет получить более равномерное распределение дозы по глубине в отличие от набора пиков Брэгга, соответствующих отдельным значениям энергии. Набор величины дозы может осуществляться за счет повторения импульсов.

Неравномерность распределения дозы в области облучения, показанная на рис. 7, – выбросы по краям области, обусловлена выбором временного промежутка отбора частиц.

Для решения обратной задачи – определения закона изменения фазы в течение СВЧ-импульса по заданному в плане облучения распределению дозы – применима изложенная в [7] методика. Обеспечивая изначально более плавное распределение дозы, регулировка ВЭ в течение СВЧ-импульса по крайней мере не снижает эффективности применения этой методики.

Заключение

Разработаны и реализованы в вычислительных программах методики моделирования как распространения СВЧ-волны в дисперсной ТW-структуре, так и динамики частиц в поле этой волны. Результаты проведенных расчетов подтверждают возможность регулировки выходной энергии ускорителя в течение СВЧ-импульса. По сравнению с регулировкой от импульса к импульсу при аналогичных параметрах пучка такая регулировка обеспечивает на порядки более высокую скорость сканирования по глубине при более равномерном распределении дозы облучения. При этом, как минимум, не усложняется задача планирования распределения дозы при облучении.

Авторы признательны А. А. Коломийцу за предоставленные данные о характеристиках пучка ЛУ в режиме номинального ускорения.

Список литературы

1. **Paramonov V. V., Durkin A. P., Kolomiets A. A.** A linear accelerator for proton therapy // Proc. RuPAC'21. 2021. P. 117–119. DOI: 10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB04
2. **Paramonov V. V. et al.** Main part of proton therapy linac // Phys. Part. Nucl. Lett. 2023. Vol. 20, no. 4. P. 850–853. DOI: 10.1134/S1547477123040544
3. **Xiao C.-C. et al.** Design and preliminary test of the LLRF in C band high-gradient test facility for SXFEL // Nucl. Sci. Tech. 2020. Vol. 31. P. 100. DOI: 10.1007/s41365-020-00806-6
4. **Овчинникова Л. Ю., Парамонов В. В.** Методика моделирования распространения СВЧ-сигнала в ТW-структуре ускорителя протонов для медицины // Сб. тр. ЛаПлас-2023. 2023. С. 300. URL: <https://conf.laplas.mephi.ru>
5. **Allison J. et al.** Recent developments in Geant4 // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2016. Vol. 835. P. 186–225. DOI: 10.1016/j.nima.2016.06.125
6. **Ovchinnikova L. Yu. et al.** Effect of a proton beam from a linear accelerator for radiation therapy // Proc. RuPAC'21. 2021. P. 182–185. DOI: 10.18429/JACoW-RuPAC2021-MOPSA41
7. **Ovchinnikova L. Yu., Kurilik A. S.** Machine learning for depth dose distribution forming in proton therapy // Physics of Atomic Nuclei. 2022. Vol. 85, no. 10. P. 1658–1660. DOI: 10.1134/S1063778822100404

References

1. **Paramonov V. V., Durkin A. P., Kolomiets A. A.** A linear accelerator for proton therapy. Proc. RuPAC'21, 2021, pp. 117–119. DOI: 10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB04
2. **Paramonov V. V. et al.** Main part of proton therapy linac. *Phys. Part. Nucl. Lett.*, 2023, vol. 20, no. 4, pp. 850–853. DOI: 10.1134/S1547477123040544

3. **Xiao C.-C. et al.** Design and preliminary test of the LLRF in C band high-gradient test facility for SXFEL. *Nucl. Sci. Tech.*, 2020, vol. 31, p. 100. DOI: 10.1007/s41365-020-00806-6
4. **Ovchinnikova L., Paramonov V.** Simulation method of the RF signal propagation in a TW structure for medical proton linac". In *Proc. LaPlas-2023*, 2023, p. 300. URL: <https://conf.laplas.mephi.ru> (in Russ.)
5. **Allison J. et al.** Recent developments in Geant4. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 2016, vol. 835, pp. 186–225. DOI: 10.1016/j.nima.2016.06.125
6. **Ovchinnikova L. Yu. et al.** Effect of a proton beam from a linear accelerator for radiation therapy. *Proc. RuPAC'21*, 2021, pp. 182–185. DOI: 10.18429/JACoW-RuPAC2021-MOPSA41
7. **Ovchinnikova L. Yu., Kurilik A. S.** Machine learning for depth dose distribution forming in proton therapy. *Physics of Atomic Nuclei*, 2022, vol. 85, no. 10, pp. 1658–1660. DOI: 10.1134/S1063778822100404

Сведения об авторах

Овчинникова Любовь Юрьевна, кандидат физико-математических наук

Дуркин Александр Павлович, кандидат физико-математических наук

Курилик Александр Сергеевич, кандидат физико-математических наук

Парамонов Валентин Витальевич, доктор физико-математических наук

Information about the Authors

Liubov Yu. Ovchinnikova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Alexander P. Durkin, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Alexander S. Kurilik, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Valentin V. Paramonov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences

*Статья поступила в редакцию 06.09.2023;
одобрена после рецензирования 11.12.2023; принята к публикации 23.12.2024*

*The article was submitted 06.09.2023;
approved after reviewing 11.12.2023; accepted for publication 23.12.2024*

Научная статья

УДК 531.8

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-43-53

Статус магнитных элементов инжектора СКИФ*

Вадим Александрович Павлюченко^{1,2}, Данила Алексеевич Никифоров^{1,3}
Александр Анатольевич Старостенко^{1,2}, Константин Владимирович Жилиев¹
Андрей Михайлович Молокоедов¹, Алексей Юрьевич Пахомов¹
Егор Александрович Субаев¹, Дмитрий Игоревич Чекменёв¹
Владимир Георгиевич Ческидов¹

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия

²Новосибирский национальный исследовательский государственный университет
Новосибирск, Россия

³Центр коллективного пользования СКИФ
Института катализа им. Г. К. Борескова СО РАН
Новосибирск, Россия

V.A.Pavlyuchenko@inp.nsk.su

D.A.Nikiforov@inp.nsk.su

A.A.Starostenko@inp.nsk.su

K.V.Zhilyaev@inp.nsk.su

A.M.Molokoedov@inp.nsk.su

A.Yu.Pakhomov@inp.nsk.su

E.A.Subaev@inp.nsk.su

D.I.Chekmenyov@inp.nsk.su

V.G.Tchekidov@inp.nsk.su

Аннотация

В статье описана магнитная система инжектора для источника СИ «Сибирский кольцевой источник фотонов» (СКИФ). Представлены результаты моделирования квадрупольных и соленоидальных линз, а также дипольных корректоров для инжектора на основе линейного ускорителя. Данные элементы должны обеспечить возможность транспортировки электронного пучка на протяжении всего ускорителя без потерь. Продемонстрированы результаты измерений всех произведенных магнитных элементов. В настоящий момент все описанные элементы штатно работают на стенде линейного ускорителя.

Ключевые слова

магнитные элементы, линейные ускорители, магнитные линзы

Благодарности

Работа частично выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института катализа СО РАН (проект FWUR-2024-0041).

Для цитирования

Павлюченко В. А., Никифоров Д. А., Старостенко А. А., Жилиев К. В., Молокоедов А. М., Пахомов А. Ю., Субаев Е. А., Чекменёв Д. М., Ческидов В. Г. Статус магнитных элементов инжектора СКИФ // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 1. С. 43–53. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-43-53

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

Status of Magnetic Elements of the SKIF Injector

Vadim A. Pavliuchenko^{1,2}, Danila A. Nikiforov^{1,3}, Alexander A. Starostenko^{1,2}
Konstantin V. Zhilyaev¹, Andrey M. Molokoedov¹, Alexey Yu. Pakhomov¹
Egor A. Subaev¹, Dmitri I. Chekmenev, Vladimir G. Cheskidov¹

¹Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk National Research State University
Novosibirsk, Russian Federation

³Center for Collective Use Siberian Circular Photon Source of the Center Institute
of Catalysis named after G. K. Borekov of SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

V.A.Pavlyuchenko@inp.nsk.su

D.A.Nikiforov@inp.nsk.su

A.A.Starostenko@inp.nsk.su

K.V.Zhilyaev@inp.nsk.su

A.M.Molokoedov@inp.nsk.su

A.Yu.Pakhomov@inp.nsk.su

E.A.Subaev@inp.nsk.su

D.I.Chekmenyov@inp.nsk.su

V.G.Tcheskidov@inp.nsk.su

Abstract

The paper describes the magnetic injector system for the SRF “Siberian Circular Photon Source” (SKIF). The results of modeling quadrupole and solenoid lenses, as well as dipole correctors for an injector based on a linear accelerator are presented. These elements should make it possible to transport the electron beam throughout the accelerator without loss. The results of measurements of all produced magnetic elements are demonstrated. The described elements are working normally at the linear accelerator stand.

Keywords

magnetic elements, linear accelerators, magnetic lenses

Funding

The work was partially carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment of the Institute of Catalysis SB RAS.

For citation

Pavliuchenko V. A., Nikiforov D. A., Starostenko A. A., Zhilyaev K. V., Molokoedov A. M., Pakhomov A. Yu., Subaev E. A., Chekmenev D. I., Cheskidov V. G.. Status of magnetic elements of the SKIF injector. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 1, pp. 43–53 (in Russ). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-43-53

Введение

На сегодняшний день в мире успешно работает более 50 источников синхротронного излучения (СИ), которые постоянно модернизируются и обновляются. SKIF – источник СИ четвертого поколения – будет иметь эмиттанс менее 100 пм·рад при энергии 3 ГэВ [1]. Одним из ключевых элементов будущего источника СИ является линейный ускоритель, который генерирует и ускоряет пучок электронов до максимальной энергии 200 МэВ. Именно в линейном ускорителе формируется качество пучка (поперечный эмиттанс и энергетический разброс). Одной из ключевых систем линейного ускорителя является система фокусировки пучка и коррекции его орбиты. Система фокусировки пучка должна быть рассчитана и спроектирована таким образом, чтобы обеспечить сохранение качества пучка в процессе его транспортировки и ускорения. В данной статье описаны магнитные элементы, разработанные для линейного ускорителя SKIF, а также приведены результаты измерений их основных параметров.

1. Описание первой очереди линейного ускорителя СКИФ

С точки зрения фокусировки пучка линейный ускоритель разделен на две части. В первой части ускорителя фокусировка пучка осуществляется аксиально-симметричными магнитными линзами, во второй части – квадрупольными линзами. Для согласования огибающей пучка между частью ускорителя с аксиально-симметричными линзами и частью, где применяется квадрупольная фокусировка, используется дублет квадрупольных линз (см. рис. 1, б). Для коррекции орбиты пучка во всем ускорителе используются два типа дипольных корректоров («рамочные» и «М-образные»).

На рис. 1 представлена схема линейного ускорителя до второй регулярной ускоряющей структуры (УС) с обозначением магнитных элементов.

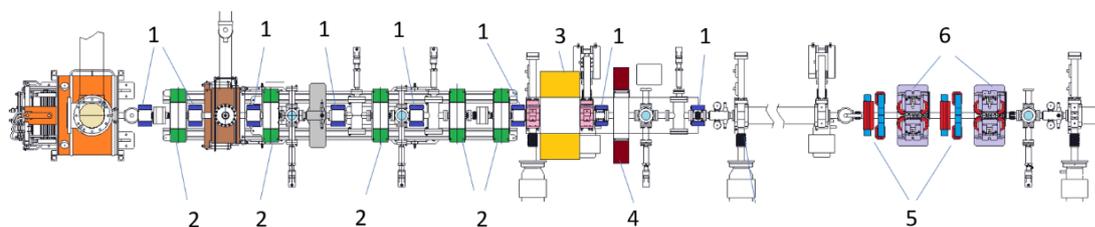


Рис. 1. Схема инжектора СКИФ: 1 – «рамочный» корректор; 2 – соленоид секции группировки; 3 – соленоид предускорителя; 4 – согласующий соленоид; 5 – «М-образный» корректор; 6 – квадрупольная линза
 Fig. 1. Scheme of the SKIF injector: 1 – “O-shape” corrector; 2 – solenoid of the grouping section; 3 – solenoid of the pre-accelerator; 4 – matching solenoid; 5 – “M-shape” corrector; 6 – quadrupole lens

Таблица 1
 Параметры линака СКИФ

Table 1

Parameters of the SKIF linac

Параметр	Значение
Номинальная энергия электронов (МэВ)	200
Частота повторений импульсов (Гц)	1
Геометрический эмиттанс при 200 МэВ (нм·рад)	150
Разброс по энергии на 200 МэВ (%)	1

После СВЧ-пушки происходит группировка пучка с помощью субгармонического группирователя с частотой 535,5 МГц. Регулярные УС линейного ускорителя предназначены для работы с релятивистским пучком. Такой пучок формируется в предускорителе-группирователе (ПГ) на основной частоте 2,856 ГГц, который служит для окончательной группировки и ускорения пучка до энергии около 3 МэВ. Для фокусировки пучка в промежутке между СВЧ-пушкой и ПГ используются пять однотипных соленоидальных линз 2. Поскольку в процессе группировки внутри ПГ пучок испытывает сильную дефокусировку, секция ПГ помещена в сильный бронированный соленоид 3. Кроме того, из-за группирующей фазы электрического поля в структуре ПГ пучок на ее выходе является расходящимся. Для его фокусировки и инжекции в первую регулярную УС установлен дополнительный согласующий соленоид 5. После первой УС пучок имеет энергию около 35 МэВ, а для его фокусировки используются квадрупольные линзы 6. В табл. 1 представлены основные параметры линейного ускорителя [2].

2. Магнитная система линейного ускорителя

2.1. Дипольные корректоры

В промежутке между СВЧ-пушкой и первой регулярной УС пучок имеет сравнительно небольшую энергию (от 0,8 до 3 МэВ). В этом случае даже незначительные ошибки в выставке магнитных элементов (аксиально-симметричные линзы) могут приводить к серьезным отклонениям пучка от центра вакуумной камеры, кроме того, величины магнитного поля земли может быть достаточно, чтобы пучок попал на стенку вакуумной камеры. Было проведено моделирование динамики пучка с учетом разумных ошибок выставки магнитных элементов. Магнитное поле земли моделировалось введением однородного вертикального магнитного поля с индукцией 45 мкТл на участке от катода до входа в первую УС. На основании моделирования были сформулированы требования на интеграл дипольного поля рамочных корректоров для описанного промежутка. Ядро каждого корректора представляет собой прямоугольную раму. На каждой стороне рамы намотаны катушки с переменным шагом, что улучшает качество поля. Такое решение позволяет в разы улучшить качество поля (однородность в зазоре изменяется от $\sim 1,2 \cdot 10^{-2}$ до $\sim 4,0 \cdot 10^{-3}$). Выбранная конструкция обеспечивает требуемое качество.

С помощью программной среды OPERA 3D¹ была смоделирована работа корректора в дипольном режиме при постоянном токе.

Для той части линейного ускорителя, в которой пучок ускоряется от 40 МэВ до 200 МэВ, были разработаны корректоры другого типа с М-образным ярмом. Такие корректоры должны обеспечивать интеграл магнитного поля более 4 Тл·мм. На прямых участках рамы намотаны катушки. Для обеспечения коррекции по двум координатам два таких электромагнита устанавливаются друг за другом, повернутые на 90° относительно друг друга по оси пролета пучка. Такая конструкция позволяет, имея не большой зазор между полюсами, обеспечить достаточное качество поля. Для оптимизации качества поля были подобраны шимы. На рис. 2 представлены изображения модели корректоров и готовые корректоры. В табл. 2 приведены расчетные параметры корректоров.

Таблица 2

Параметры корректоров

Table 2

Correctors parameters

Тип корректора	Рамочный	М-образный
Ток максимальный (А)	3	3,75
Максимальная индукция магнитного поля в центре корректора (Гс)	20,4	495
Максимальный интеграл магнитного поля (Тл·мм)	0,29	4,69
Однородность интеграла магнитного поля в области радиусом 10 мм $\Delta[B]/B$	$< 5,0 \cdot 10^{-3}$	

Представленные дипольные корректоры были изготовлены на производстве ИЯФ СО РАН и в настоящее время установлены на стенд линейного ускорителя. После изготовления элементов были проведены магнитные измерения с помощью «каретки» с датчиками Холла. Измерения показали, что магнитное поле в центре «рамочных» корректоров при токе 3 А составляет от 20,2 до 20,8 Гс. Эффективная длина корректора составила от 143,2 до 143,8 мм. Измеренная

¹ OPERA – electromagnetic and electromechanical simulation. URL: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/opera>

интегральная однородность поля ($\Delta|B|/|B|$) на радиусе 10 мм: от 0,27 до 0,6 %. Магнитное поле в центре «М-образного» корректора при токе 3,75 А составляет от 496 до 499 Гс, эффективная длина в диапазоне от 94,4 до 94,7 мм, а интегральная однородность магнитного поля ($\Delta|B|/|B|$) не превысила 0,5 %. На рис. 3 изображены графики измеренной однородности магнитного поля в зазоре корректоров, а на рис. 4 представлены расчетные и измеренные поля на оси корректоров.

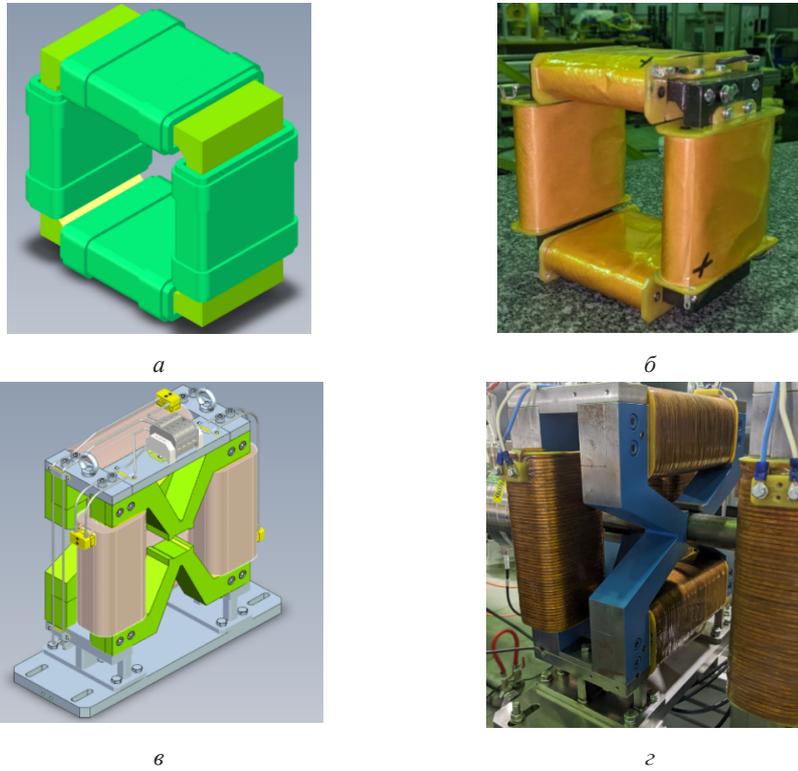


Рис. 2. Модели корректоров: а – трехмерная модель «рамочного» корректора; б – изготовленный рамочный корректор; в – трехмерная модель «М-образного» корректора; г – изготовленный «М-образный» корректор
 Fig. 2. Corrector models: а – 3D model of “O-shape” corrector; б – manufactured “O-shape” corrector; в – 3D model of “M-shape” corrector; г – manufactured “M-shape” corrector

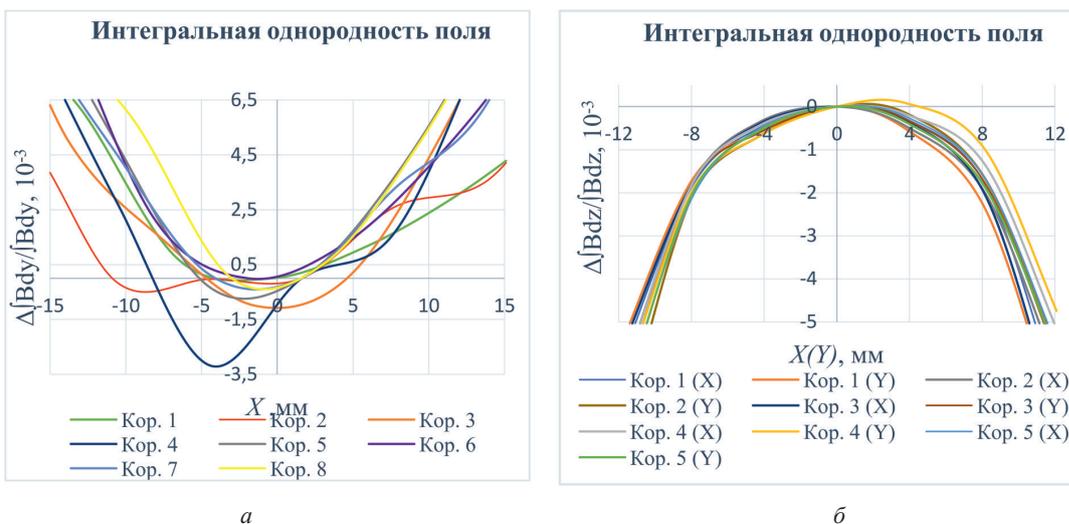


Рис. 3. Однородность поля: а – в «рамочных» корректорах; б – в «М-образных» корректорах
 Fig. 3. Field homogeneity: а – in “O-shape” correctors; б – in “M-shape” correctors

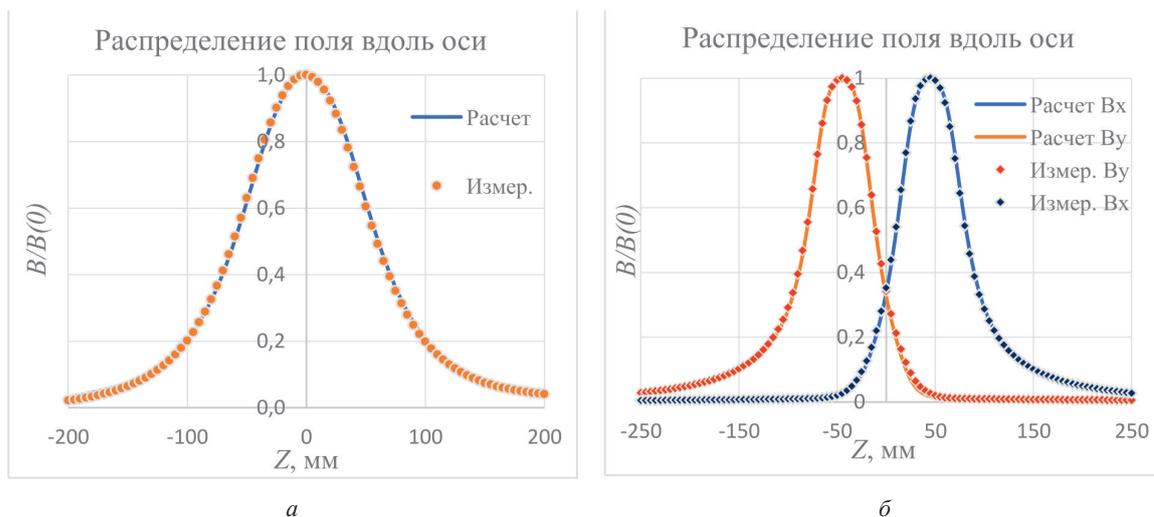
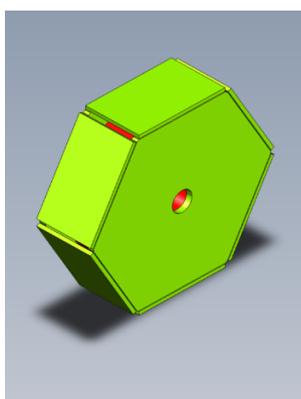


Рис. 4. Распределение поля вдоль оси: a – в «рамочных» корректорах (расчетное и измеренное); b – в «М-образных» корректорах (расчетное и измеренное)
 Fig. 4. Field distribution along the axis: a – in “O-shape” correctors (calculated and measured); b – in «M-shape» correctors (calculated and measured)

2.2. Соленоиды секции группировки

Линзы секции группировки предназначены для фокусировки пучка в промежутке от ВЧ-пушки до ПГ. Ядро линзы выполнено из стали 10. Состоит из двух торцевых пластин, выполненных в форме шестиугольника и шести пластин, соединяющих торцевые для замыкания магнитного ядра. Выбранная форма брони линзы в виде многогранника существенно упрощает процесс изготовления линзы, при этом не нарушая симметрии поля на всей апертуре вакуумной камеры. Внутри ядра располагается соленоидальная катушка. На рис. 5 представлено изображение такого соленоида, а в табл. 3 приведены его параметры.



a



b

Рис. 5. Соленоид соленоида секции группировки: a – модель соленоида секции группировки; b – изготовленная линза

Fig. 5. Model of the solenoid of the grouping section (a); manufactured lens (b)

Таблица 3

Параметры соленоидов секции группировки

Table 3

Parameters of the solenoids of the grouping section

Параметр	Значение
Апертура (мм)	38
Габаритные размеры линзы (мм)	$342 \times 342 \times 100$
Максимальный ток (А)	6
Магнитное поле в центре линзы при токе 6 А (Гс)	839

Для всех линз были проведены магнитные измерения распределения фокусирующего поля на оси. Магнитное поле в линзах при токе 6 А находится в пределах от 858 до 870 Гс. На рис. 6 представлен сравнительный график рассчитанного и измеренного распределения магнитного поля на оси линзы.

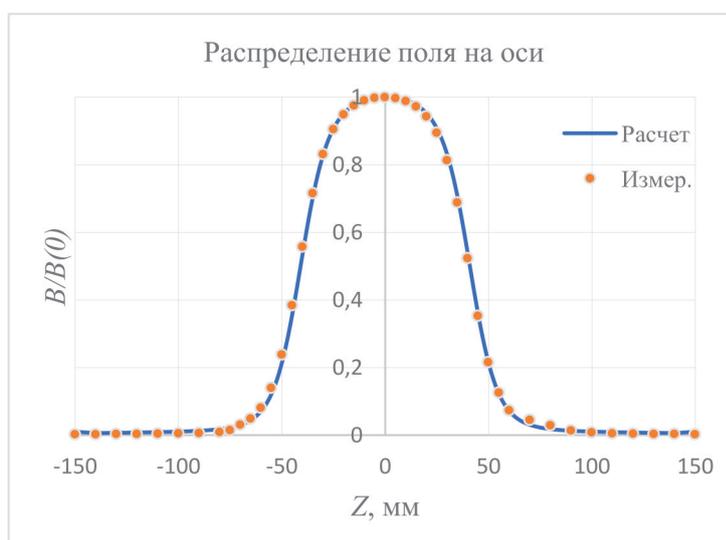


Рис. 6. Измеренное и рассчитанное распределение поля вдоль оси соленоида секции группировки
 Fig. 6. The measured and calculated field distribution along the axis of the solenoid of the grouping section

2.3. Соленоид предускорителя

Другим типом соленоида, используемого на ускорителе, является соленоид, внутрь которого помещен ПГ. Его особенностью является то, что он состоит из двух независимых обмоток. Такое решение позволяет варьировать распределение магнитного поля вдоль оси соленоида, что может позволить обеспечить более гибкую настройку пучка в ускорителе. На рис. 7 изображена модель соленоида предускорителя с гирдером и креплением, а в табл. 4 приведены его параметры.

Для случая, когда обе катушки запитаны на максимальный ток, дана оценка поперечных полей на оси пучка, связанных с наличием отверстий под выводы проводов в броне и наличием в гирдере материалов с магнитной проницаемостью, отличной от единицы. Из-за отсутствия симметрии, вызванной наличием отверстий под выводы, в магните появились поперечные компоненты поля на оси линзы. Добавлением симметричных отверстий в стальной броне уда-

лось скомпенсировать поперечные компоненты поля. На рис. 8 представлены распределения поперечных полей на оси линзы до и после симметризации.

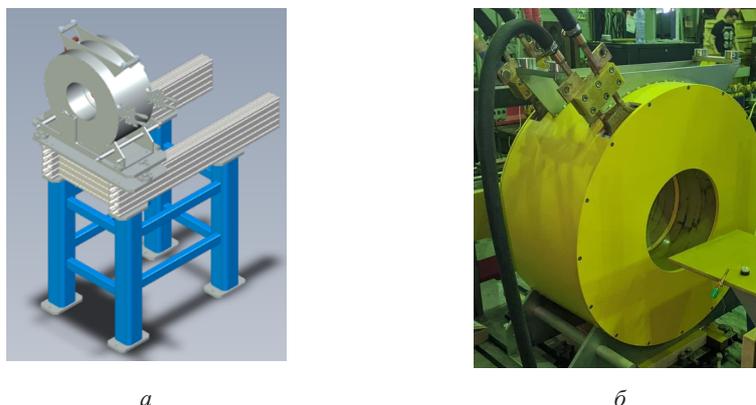


Рис. 7. Соленоид предускорителя:
a – модель соленоид предускорителя; *б* – изготовленный соленоид предускорителя
 Fig. 7. Model of the pre-accelerator solenoid (*a*); Manufactured pre-accelerator solenoid (*b*)



Рис. 8. Поперечное поле на оси соленоид предускорителя до добавления симметричных отверстий и после
 Fig. 8. Transverse field on the axis of the pre-accelerator solenoid before the addition of symmetrical holes and after

Таблица 4

Параметры соленоид предускорителя

Table 4

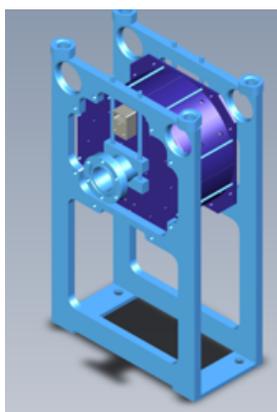
Parameters of the pre-accelerator solenoid

Параметр	Значение
Апертура (мм)	225
Габаритные размеры линзы (мм)	555 × 555 × 260
Ток максимальный (А)	200
Магнитное поле в центре линзы при включении двух соленоидов (Тл)	0,23
Эффективная длина линзы (мм)	330

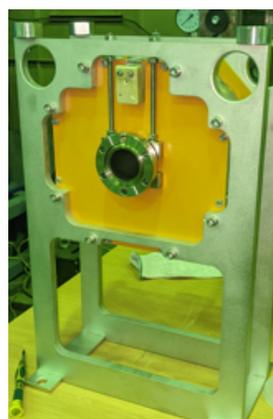
После изготовления данные соленоиды были измерены с помощью датчиков холла. При токе 200 А в обоих соленоидах магнитное поле достигает 0,25 Тл.

2.4. Согласующий соленоид

Согласующий соленоид служит для фокусировки и согласования размера пучка при инжекции в первую регулярную УС и должен иметь поле в центре порядка 0,1 Тл при эффективной длине примерно 90 мм. Ядро линзы состоит из двух торцевых пластин и четырех арок круглой формы, собранных поверх соленоидальной катушки. На рис. 9 представлена модель соленоида после проработки конструктором, а в табл. 5 указаны его параметры.



а



б

Рис. 9. Модель соленоида после проработки конструктором:
а – модель согласующего соленоида; б – изготовленный соленоид
Fig. 9. Model of the matching solenoid (a); Manufactured solenoid (b)

Таблица 5

Параметры согласующего соленоида

Table 5

Parameters of the matching solenoid

Параметр	Значение
Апертура (мм)	40
Габаритные размеры линзы (мм)	190 × 190 × 100
Ток максимальный (А)	3
Максимальное магнитное поле в центре линзы (Тл)	0,1
Эффективная длина линзы (мм)	92

2.5. Квадрупольные линзы

В табл. 6 представлены расчетные параметры линз. Ядро линз изготовлено из стали 10. Для уменьшения интегральных высших гармоник, разрешенных симметрией, была проведена работа по подбору формы шимов на полюсе линзы. Также для подавления шестой гармоники была выбрана фаска на полюсах размером 4,00 × 3,95 мм. На рис. 10 показана трехмерная модель линзы и готовая линза.

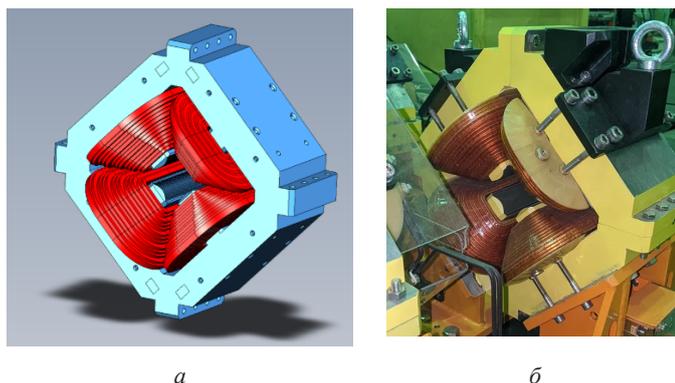


Рис. 10. Квадрупольная линза:
a – модель квадрупольной линзы; *б* – изготовленный элемент
 Fig. 10. Model of a quadrupole lens (*a*); manufactured element (*b*)

Таблица 6

Расчетные параметры квадрупольных линз линака SKIF

Table 6

Calculated parameters of linac SKIF quadrupole lenses

Параметр	Значение
Апертура (мм)	40
Габаритные размеры линзы (мм)	$310 \times 310 \times 200$
Ток максимальный (А)	6
Интеграл градиент в центре линзы при токе 6 А (Тл)	0,62
Нормированная на основную шестая нормальная интегральная гармоника (B_6/B_2) на радиусе 15 мм	$< 5,0 \cdot 10^{-4}$
Нормированная на основную десятая нормальная интегральная гармоника (B_{10}/B_2) на радиусе 15 мм	$< 5,0 \cdot 10^{-4}$

В настоящее время квадрупольные линзы установлены на стенд линейного ускорителя. После изготовления элементов были проведены магнитные измерения с использованием вала с вращающейся катушкой. Измерения показали, что интеграл магнитного поля при токе 6 А составляет от 0,608 до 0,611 Тл. А интегральные гармоники для B_6/B_2 не превышают $3,67 \cdot 10^{-4}$, а для B_{10}/B_2 достигают $2,5 \cdot 10^{-4}$.

Заключение

В работе были представлены результаты моделирования и измерения магнитных элементов линейного ускорителя SKIF. Все созданные магнитные элементы удовлетворяют требованиям и были испытаны на стенде линейного ускорителя, обеспечив полное токопрохождение пучка электронов.

Список литературы

1. **Гуров С. М. и др.** Инжекционная система для сибирского кольцевого источника фотонов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2020. № 7. С. 3–7.
2. **Andrianov A. et al.** Development of 200 MeV linac for the SKIF light source injector // *Journal of Instrumentation*. 2022. Vol. 17, №. 02. P. T02009.

References

1. **Gurov S. et al.** Injection system for Siberian circle photon source. *Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies*, 2020, no. 7, pp. 3–7. (in Russ.)
2. **Andrianov A. et al.** Development of 200 MeV linac for the SKIF light source injector // *Journal of Instrumentation*, 2022, vol. 17, no. 02, pp. T02009.

Сведения об авторах

Павлюченко Вадим Александрович, младший научный сотрудник
Никифоров Данила Алексеевич, научный сотрудник
Старостенко Александр Анатольевич, заведующий сектором
Жлияев Константин Владимирович, младший научный сотрудник
Молокоедов Андрей Михайлович, ведущий инженер-конструктор
Пахомов Алексей Юрьевич, младший научный сотрудник
Субаев Егор Александрович, инженер-исследователь
Чекменёв Дмитрий Игоревич, инженер-конструктор 1-й категории
Владимир Георгиевич Ческидов, старший научный сотрудник

Information about the Authors

Vadim A. Pavlyuchenko, Junior Researcher
Danila A. Nikiforov, Researcher
Alexander A. Starostenko, Head of the Sector
Konstantin V. Zhilyaev, Junior Researcher
Andrey M. Molokoyedov, Lead Design Engineer
Alexey Y. Pakhomov, Junior Researcher
Egor A. Subaev, Researcher-Engineer
Dmitri I. Chekmenev, Design Engineer
Vladimir G. Cheskidov, Senior Researcher

*Статья поступила в редакцию 14.09.2023;
одобрена после рецензирования 10.01.2024; принята к публикации 21.01.2024*

*The article was submitted 14.09.2023;
approved after reviewing 10.01.2024; accepted for publication 21.01.2024*

Научная статья

УДК 681.513.1, 681.5.08

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-54-60

Разработка и внедрение системы автоматизации ионного источника D-Race для ускорителя VITA*

Алексей Михайлович Кошкарев¹

Иван Михайлович Щудло²

Сергей Юрьевич Таскаев³

¹⁻³ Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

¹⁻³ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия

¹koshi8bit@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9471-7904>

²cshudlo.i.m@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8130-5249>

³taskaev@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-5313-2563>

Аннотация

В Институте ядерной физики СО РАН (ИЯФ СО РАН) разработан ускорительный источник эпитепловых нейтронов VITA, используемый для развития методики бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) злокачественных опухолей и ряда других приложений. Для управления установкой, хранения и анализа данных ранее создана система автоматизации, позволяющая оператору обеспечивать длительное стабильное получение пучка протонов или дейтронов в широком диапазоне изменения энергии и тока, а научным сотрудникам получать экспериментальные данные и обрабатывать их в режиме реального времени.

В настоящее время ИЯФ СО РАН изготавливает ускорительный источник нейтронов VITA для Национального медицинского исследовательского центра онкологии им. Н. Н. Блохина в Москве и планирует ввести его в эксплуатацию в 2025 г. В отличие от работающей экспериментальной установки ИЯФ СО РАН будет использоваться источник ионов компании D-Race (Канада).

В данной работе представлена процедура автоматизации нового ионного источника, алгоритмы управления, коэффициенты PID-регулятора и рабочие параметры, которые позволили получить максимальный средний ток пучка на цилиндре Фарадея 13 мА со стабильностью 0,14 %.

Ключевые слова

бор-нейтронозахватная терапия, VITA, ионный источник, D-Race, автоматизация, стабилизация

Финансирование

Работы выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

Для цитирования

Кошкарев А. М., Щудло И. М., Таскаев С. Ю. Разработка и внедрение системы автоматизации ионного источника D-Race для ускорителя VITA // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 1. С. 54–60. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-54-60

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

Development and Implementation of the D-Pace Ion Source Automation System for the VITA Accelerator

Alexey M. Koshkarev¹, Ivan M. Shchudlo²
Sergey Yu. Taskaev³

¹⁻³Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

¹⁻³Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

¹koshi8bit@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9471-7904>
²cshudlo.i.m@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8130-5249>
³taskaev@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-5313-2563>

Abstract

The VITA accelerator neutron source based on a vacuum insulated tandem accelerator operates at the Institute of Nuclear Physics SB RAS. The development of a separate compact facility for the generation of fast neutrons is an actual task, it will allow the treatment of malignant tumors via boron-neutron capture therapy with fast neutrons and a number of other applications. To control the facility, store and analyze data, the author has previously created an automation system that allows the operator to provide long-term stable proton or deuteron beam production in a wide range of energy and current variations, and scientific staff to obtain experimental data and process them in real time.

Currently, the BINP SB RAS is manufacturing the accelerating neutron source VITA for the National Medical Research Center for Oncology named after N. N. Blokhina in Moscow. It is planned to put it into operation in 2025. In contrast to the operating experimental installation of the BINP SB RAS, an ion source from the D-Pace company (Canada) will be used.

This paper presents the automation procedure for the new ion source, control algorithms, PID controller coefficients and operating parameters, which made it possible to obtain a maximum average beam current on the Faraday cup of 13 mA with a stability of 0.14%.

Keywords

boron neutron capture therapy, VITA, ion source, D-Pace, automation, stabilization

For citation

Koshkarev A. M., Shchudlo I. M., Taskaev S. Yu. Development and implementation of the D-Pace ion source automation system for the VITA acceleration. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 1, pp. 54–60 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-54-60

Введение

Заболеваемость злокачественными образованиями значительна, поэтому требуется развитие новых методов лечения. Одним из таких методов является бор-нейтрозахватная терапия [1] (БНЗТ), предложенная в 1936 г. Данная терапия позволяет избирательно воздействовать на опухолевые клетки, не повреждая здоровые, и таким образом лечить пока что неизлечимые злокачественные опухоли [2], такие как глиомы головного мозга высокой степени злокачественности, включая глиобластому, рак мягких тканей головы и шеи, рак кожи (меланому) и его метастазы.

Метод показал свою эффективность, и в разных странах в конце 90-х годов прошлого столетия было принято решение внедрять его в клиническую практику. На тот момент единственным источником нейтронов нужного спектра и плотности были ядерные реакторы, которые практически невозможно установить в медицинском учреждении из-за их больших размеров, дороговизны и радиационной опасности. Поэтому несколько команд начали работу по созданию компактных ускорителей заряженных частиц для генерирования нейтронов, которые можно установить в медицинских учреждениях.

В Институте ядерной физики СО РАН разрабатывается ускорительный источник тепловых нейтронов VITA [3], энергия которых идеально подходит для проведения БНЗТ зло-

качественных опухолей в условиях онкологической клиники. Ускоритель представляет собой экспериментальную физическую установку, на которой проведено множество экспериментов, показавших готовность использования концепции ускорителя в клинике. Один из следующих шагов к реализации медицинской установки – замена старого ионного источника на разработку компании D-Pace (Канада)¹ для Национального медицинского исследовательского центра онкологии им. Н. Н. Блохина в Москве. Данная работа посвящена разработке системы автоматизации нового ионного источника.

Ионный источник D-Pace

Создание пучка отрицательных ионов водорода является первой ступенью в процессе генерации нейтронов. В качестве инжектора для медицинской установки был выбран ионный источник D-Pace (Канада), который способен генерировать пучок отрицательных ионов водорода с током до 15 мА и энергией до 30 кэВ. Общий вид платформы ионного источника представлен на рис. 1.

Одна из особенностей управления заключается в том, что ионный источник и его периферия расположены на различных потенциалах: 1) -150 кВ; 2) -180 кВ; 3) потенциал земли. На рис. 2. представлена упрощенная схема подключения блоков питания и системы автоматизации.

Для управления и стабилизации тока пучка разработана программа на языке C++ и фреймворком Qt. Для отображения графиков реального времени с частотой обновления 50 Гц и количеством серий данных в 20 параметров был разработан собственный компонент, в основе которого стала общедоступная библиотека QCustomPlot.

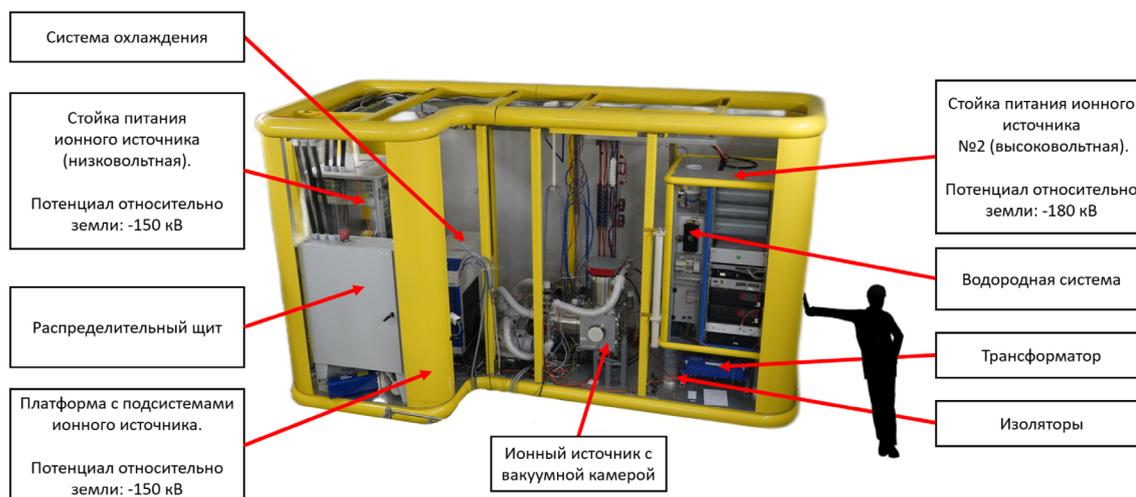


Рис. 1. Общий вид ионного источника и его частей
Fig. 1. General view of the ion source and its parts

¹ Ионный источник D-Pace. URL: <https://www.d-pace.com/?e=304> (дата обращения: 15.09.2023).

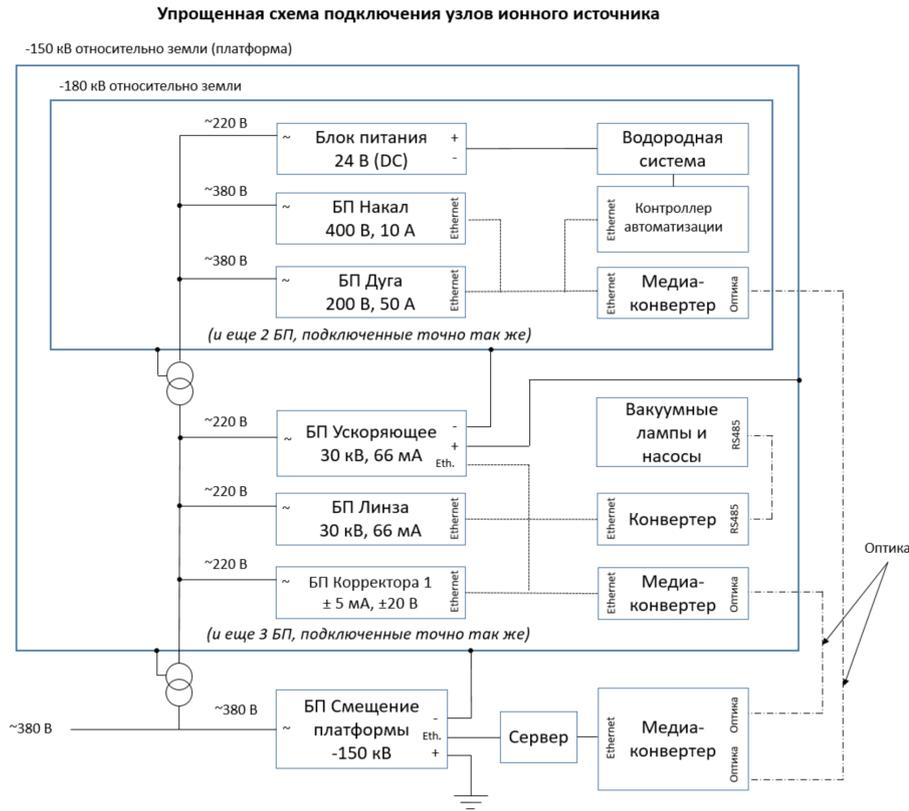


Рис. 2. Упрощенная схема подключения узлов ионного источника
 Fig. 2. Simplified wiring diagram of the ion source nodes

Разработанная программа позволяет управлять: водородной системой (клапанами, датчиками давления, регулятором расхода водорода) через контроллеры ввода-вывода, блоками питания при помощи стандартных протоколов Modbus и SCPI, а также блоками питания CAENels FAST-PS 0520-100 и вакуумными лампами с нестандартными протоколами. Чтобы исключить влияние электромагнитных наводок, все узлы (кроме цилиндра Фарадея и водородной системы) управляются и диагностируются через цифровые интерфейсы Ethernet и RS485. Для реализации автоматического обновления и управления версиями программы и был настроен CI/CD на локальном сервере при помощи GitLab, в котором настроена автоматическая статическая компиляция и сохранением каждой версии в архив, что значительно упрощает процедуру отката до стабильной версии при необходимости.

Стабилизация

Для генерации пучка ионов водорода со стабильным током следует поддерживать стабильный ток дуги при помощи изменения тока накала. Для этого был разработан алгоритм, который состоит из двух частей: 1) таблица параметров; 2) PID-регулятор. Значение тока пучка зависит от различных параметров: токов и напряжений на восьми блоках питания, а также потока водорода. Для автоматизированной генерации тока пучка предлагается реализовать таблицу, которую оператор разово заполняет в процессе наладки источника. Значения токов, напряжений и потока водорода в таблице подбираются экспериментально и устанавливаются в зависимости от требуемого тока.

На рис. 3 показана структура таблицы и логика PID-регулятора: в первой колонке заполнены желаемые значения тока пучка ионов водорода с шагом, например, 1 мА. Во всех остальных

колонках указывается напряжение/ток, которое нужно установить на блоках питания или поток водорода на регуляторе расхода. Если запрашиваемый оператором ток точно не совпадает с током из таблицы – алгоритм вычисляет промежуточное значение между ближайшими строками в таблице при помощи линейной интерполяции для каждого параметра.



Рис. 3. Таблица параметров и логика PID-регулятора
Fig. 3. Parameter table and PID controller inputs

Без использования PID-регулятора удавалось получить ток пучка 5,4 мА на цилиндре Фарадея, при этом оператор вручную задавал ток накала каждые 1–2 с, что неприемлемо для медицинской установки. Для стабилизации тока накала при помощи PID-регулятора следует на вход подать целевой ток дуги из таблицы и его измеренное значение из блока питания. Выход регулятора управляет током блока питания накала. Чтобы получить ток пучка ионов более 13 мА, требуется реализовать систему со временем реакции менее 10 мс за весь цикл синхронизации: 1) измерение тока дуги; 2) расчет нового значения тока накала в PID-регуляторе; 3) установка тока накала.

Результаты и обсуждения

С использованием PID-регулятора получен пучок ионов с током 11,5 мА, стабильностью 3 % на протяжении двух с половиной часов. В другом эксперименте удалось получить пучок ионов с током 13 мА со стабильностью 0,14 % на протяжении часа. Такая стабильность не яв-

Параметры узлов ионного источника для различных токов пучка

Parameters of ion source nodes for various beam currents

Ток пучка на цилиндре Фарадея, мА	Поток водорода, ссст	Напряжение плазмы, В	Напряжение вытягивающее, кВ	Ток дуги цель, А	P	I	D
1	2	3	4	5	6	7	8
2,65	5,5	2,8	3	1,6	0,05	0,001	10
3,46	6	2,9	4	1,8			
4,1	6,5	3,1	5	1,8			
4,66	7	3,2	6	1,9			
5,25	7,5	3,35	7	2			
5,76	8	3,4	8	2,2			

Окончание табл.

1	2	3	4	5	6	7	8
6,25	8,5	3,4	9	2,2			
6,7	8,5	3,5	10	2,3			
7,12	9	3,7	11	2,35			
7,54	9,5	3,7	12	2,4			
7,95	11	3,7	13	2,45			
8,3	11,5	3,75	14	2,5	0,01		6
8,64	12	3,8	15	2,65			
8,97	12,5	3,85	16	2,75			
9,22	12,6	3,9	17	2,8			
9,52	13	3,95	18	2,9			
9,79	13,3	4	19	2,95			
10	13,5	4	20	3			
10,25	13,7	4,1	21	3			
10,5	14	4,1	22	3,05			
10,53	14,5	4,15	23	3,05			
10,76	14,5	4,2	24	3,15	0,001		
10,97	14,7	4,25	25	3,15			
11,2	15	4,3	26	3,15			
11,4	15,3	4,35	27	3,25			
11,62	15,5	4,35	28	3,25			
11,8	15,8	4,4	29	3,3			
11,97	16	4,4	30	3,3			

ляется порогом для этого источника. Оказалось, что со временем ток пучка уменьшается примерно на 0,5 мА каждый час, из-за чего расчетное значение стабильности ощутимо падает. Эту особенность возможно нивелировать путем автоматического увеличения устанавливаемого тока пучка до тех пор, пока измеренный ток на цилиндре Фарадея не сравняется с требуемым (следует управлять блоками питания при помощи таблицы параметров). В таблице приведены параметры узлов для различных токов пучка на цилиндре Фарадея и параметры PID-регулятора.

Заключение

Разработанный и внедренный комплекс автоматизации источника ионов D-Race позволил получить пучок отрицательных ионов водорода с требуемым для терапии током и стабильностью при минимальном участии оператора. Комплекс автоматизации дает возможность генерировать поток нейтронов на ускорительном источнике нейтронов VITA для проведения бор-нейтронозахватной терапии в Национальном медицинском исследовательском центре онкологии им. Н. Н. Блохина в Москве.

Список литературы / References

1. **Ahmed M. et al.** (Eds.) Advances in Boron Neutron Capture Therapy. *International Atomic Energy Agency*, Vienna, Austria, June 2023.
2. **Sauerwein W. A. G. et al.** (Eds.). Neutron capture therapy: principles and applications. *Springer Science & Business Media*, 2012.
3. **Taskaev S. et al.** Neutron Source Based on Vacuum Insulated Tandem Accelerator and Lithium Target. *Biology*, 2021, vol. 10, p. 350. DOI: 10.3390/biology10050350

Сведения об авторах

Кошкарев Алексей Михайлович, аспирант

Щудло Иван Михайлович, научный сотрудник

Таскаев Сергей Юрьевич, доктор физико-математических наук

Information about the Authors

Alexey M. Koshkarev, PhD Student

Ivan M. Shchudlo, Researcher

Sergey Yu. Taskaev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences

*Статья поступила в редакцию 16.11.2023;
одобрена после рецензирования 20.11.2023; принята к публикации 12.12.2023*

*The article was submitted 16.11.2023;
approved after reviewing 20.11.2023; accepted for publication 12.12.2023*

Научная статья

УДК 621.384.6.01

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-61-67

Анализ реализации модифицированного пирсовского электрода*

Роман Викторович Ли¹, Татьяна Александровна Девятайкина²

Данила Алексеевич Никифоров³

¹⁻³Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия

¹roman.lithium@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-0146-8665>

²T.A.Devyataikina@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-3404-7515>

³D.A.Nikiforov@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-6034-5778>

Аннотация

В исследовании проведен сравнительный анализ некоторых приближенных и точных решений для модифицированного формирующего электрода в пушке Пирса с тепловым зазором. С использованием численного моделирования показана степень эквивалентности разных решений с точки зрения практической реализации и качества пучка. Наконец, представлена конкретная форма модифицированного пирсовского электрода с учетом реалистичных ограничений на произвольность конструкции.

Ключевые слова

электронная пушка, пирсовский электрод, моделирование, электронный пучок

Для цитирования

Ли Р. В., Девятайкина Т. А., Никифоров Д. А. Анализ реализации модифицированного пирсовского электрода // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 1. С. 61–67. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-61-67

Analysis of a Modified Pierce Electrode Implementation

Roman V. Li¹, Tatyana A. Devyataykina²

Danila A. Nikiforov³

¹⁻³Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

¹roman.lithium@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-0146-8665>

²T.A.Devyataikina@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-3404-7515>

³D.A.Nikiforov@inp.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-6034-5778>

Abstract

The study provides a comparative analysis of some approximate and exact solutions for a modified forming electrode in a Pierce gun with a thermal gap. Using numerical simulation, the degree of equivalence of different solutions is shown from the point of view of practical implementation and beam quality. Finally, a specific shape of the modified Pierce electrode is presented, taking into account realistic constraints on the design freedom.

Keywords

electron gun, Pierce electrode, modelling, electron beam

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

For citation

Li R. V., Devyataykina T. A., Nikiforov D. A. Analysis of a modified Pierce electrode implementation. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 1, pp. 61–67 (in Russ). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-61-67

Введение

Задача о формировании цилиндрического электронного пучка является классической в ускорительной физике. Простейшее решение этой задачи геометрическим образом приведено Дж. Р. Пирсом и подробно рассмотрено в [1]. Решение представляет собой, в сущности, плоский электрод с половинным углом раствора $67,5^\circ$; схематическое изображение его и некоторых эквипотенциалей представлено на рис. 1. Очевидно, анод должен иметь сложную форму в виде эквипотенциала соответствующего потенциала или быть приближенным к ней. В таком случае при эмиссии в ρ -режиме (ограниченной пространственным зарядом) формируемый пучок будет состоять из параллельных и равномерно распределенных по радиусу траекторий.

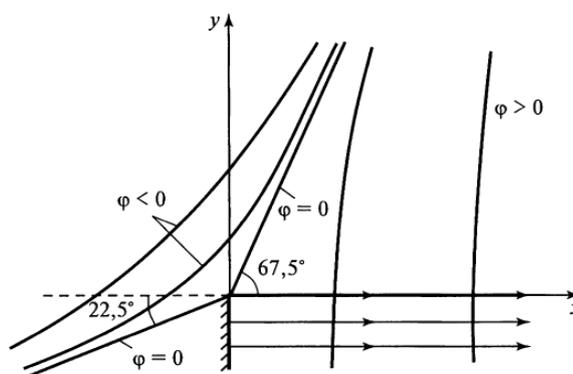


Рис. 1. Электрод и эквипотенциалы пушки Пирса
Fig. 1. The electrode and equipotential lines of a Pierce gun

Однако создание пирсовского электрода в исходном виде невозможно по нескольким причинам. В частности, существует необходимость обеспечивать тепловую изоляцию между катодом и формирующим электродом. Формируемый для этой цели тепловой зазор при сохранении исходной формы электрода искажает распределение потенциала вблизи катода, что ведет к резкому ухудшению качества пучка. Соответственно, встает вопрос о том, как именно можно компенсировать наличие теплового зазора, сохранив одновременно однородность и коллинеарность потока электронов.

Для реализации теплового зазора форма электрода изменяется с плоской на некоторую сложную, повторяющую форму эквипотенциала с рис. 1. Для подобных эквипотенциалей существует приближенное уравнение, однако анализ точного выражения с учетом структуры пучка является достаточно трудоемкой задачей. В связи с этим имеет смысл сравнить эти два варианта с исходной конфигурацией Пирса и определить, имеет ли смысл использовать приближенное решение вместо точного.

Для сравнительного анализа в данном исследовании использовано два критерия. С одной стороны, измерена точность совпадения кривых, соответствующих точному и приближенному решению. С другой стороны, проанализированы свойства пучка на выходе из пушки, смоделированной с помощью программного обеспечения WinSAM. На основе результатов показано, насколько оправдано использовать рассмотренный метод в качестве решения проблемы теплового зазора.

Решение уравнений на эквипотенциали

В качестве приближенного выражения для потенциала использовалась зависимость для ленточного пучка Пирса, приведенная в [1] и эквивалентная выражению

$$\phi = \frac{1}{2} \left(\frac{9J}{2} \right)^{\frac{2}{3}} Re w^{\frac{4}{3}}, \quad w = z + i(R-1), \tag{1}$$

где J – плотность тока; z, R – цилиндрические координаты с осью симметрии, совпадающей с осью пучка. Катод предполагается круглым с радиусом $r = 1$.

Несколько вариантов построения точного решения для цилиндрического пучка приведено в работе [2], однако для нашей задачи самым удобным оказывается выражение из работы [3] (заметим, что в [2] выражение приведено с критической ошибкой):

$$\phi = \frac{1}{2} \left(\frac{9J}{2} \right)^{\frac{2}{3}} \left(Re w^{\frac{4}{3}} + \frac{2}{\pi} I \right),$$

$$I = \int_1^R \frac{Re \zeta^{\frac{4}{3}} dx}{[R(R+x)(2+R-x)]^{\frac{1}{2}}} \left\{ E(\sigma) - \frac{2(R-1)}{(R-x)(R+x-2)} [K(\sigma) - E(\sigma)] \right\},$$

$$w = z + i(R-1), \quad \zeta = z + i(x-1),$$

$$\sigma^2 = \frac{(R-x)(R+x-2)}{(R+x)(R-x+2)}, \tag{2}$$

где $K(\sigma), E(\sigma)$ – полные эллиптические интегралы 1-го и 2-го рода. Данное выражение отличается от (1) только наличием дополнительного слагаемого в виде интеграла.

Для получения формы электрода необходимо решить уравнение $\phi(z, R) = \phi(0)$; решением же будет некоторая кривая в плоскости (z, R) . Так как аналитически решить уравнение с использованием (2) не представляется возможным, уравнения были решены численно; соответствующие кривые представлены на рис. 2. Для решения уравнения задавался конкретный по-

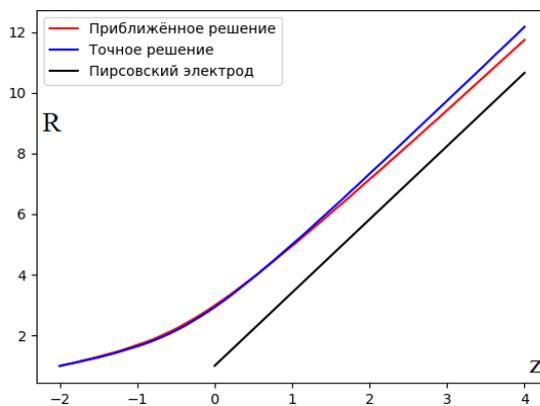


Рис. 2. Эквипотенциали для $\phi_0 = -5$ кВ
 Fig. 2. Equipotential lines for $\phi_0 = -5$ kV

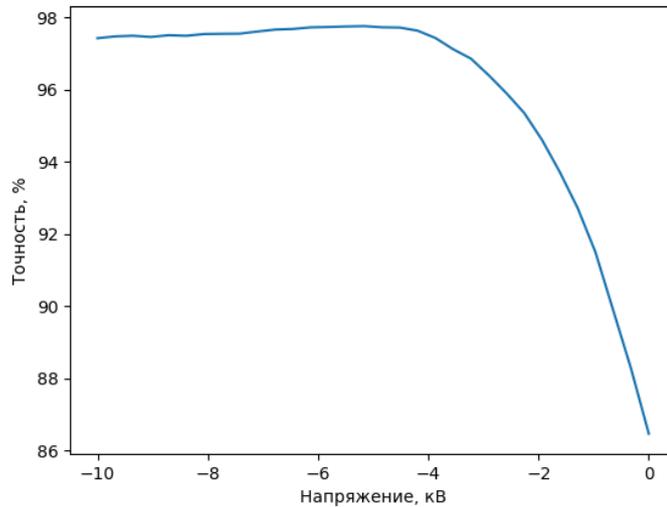


Рис. 3. Зависимость точности совпадения от напряжения на электроде
 Fig. 3. Alignment-voltage dependence for an electrode

тенциал ϕ , некоторое значение z_0 и некоторый диапазон по R ; далее уравнение $\phi(_) \Big|_{z=z_0} = \phi(0)$ решалось методом бисекции с точностью 0,1 мм (разумеется, можно использовать любой другой метод для повышения эффективности). Результат решения был представлен в виде массива точек, распределенных равномерно вдоль оси z с шагом 0,5 мм. Для генерации формы анода использовались эти же уравнения, однако решение представлялось в виде точек, равномерно распределенных по R .

Для определения точности совпадения кривых была использована следующая функция точности от двух векторов \mathbf{a} и \mathbf{b} размерности N :

$$D(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = 1 - \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \frac{a_i - b_i}{a_i + b_i}. \quad (3)$$

Данная функция равна единице для совпадающих кривых и нулю, если кривые бесконечно удалены друг от друга. При этом максимальное совпадение графиков наблюдается для $\phi_0 \sim 5$ кВ (см. рис. 3), поэтому в данном исследовании все расчеты проводились именно для этого напряжения.

Анализ параметров пучка

Для анализа динамики пучка с помощью ПО WinSAM были смоделированы три пушки с энергией пучка 57 КэВ. Первая пушка имела в качестве формирующего электрода конус с половинным углом раствора $67,5^\circ$ (пушка Пирса, схема 1), форма двух других задавалась решениями, рассмотренными в предыдущем разделе ($\phi_0 \sim -5$ кВ; приближенное и точное решения – схемы 2 и 3 соответственно). Эмитирующая поверхность имела форму плоского диска радиусом 1 мм. Эмиссия происходила в р-режиме, результирующие токи для трех схем составили 2,6, 2,9 и 2,85 А соответственно.

В результате расчетов были получены картины движения электронного пучка в данных схемах, результаты моделирования представлены на рис. 5. Траектории электронов на иллюстрациях окрашены в фиолетовый цвет и направлены вправо. Слева от изображения траекторий представлены графики распределения электронной плотности (синий) и угла между на-

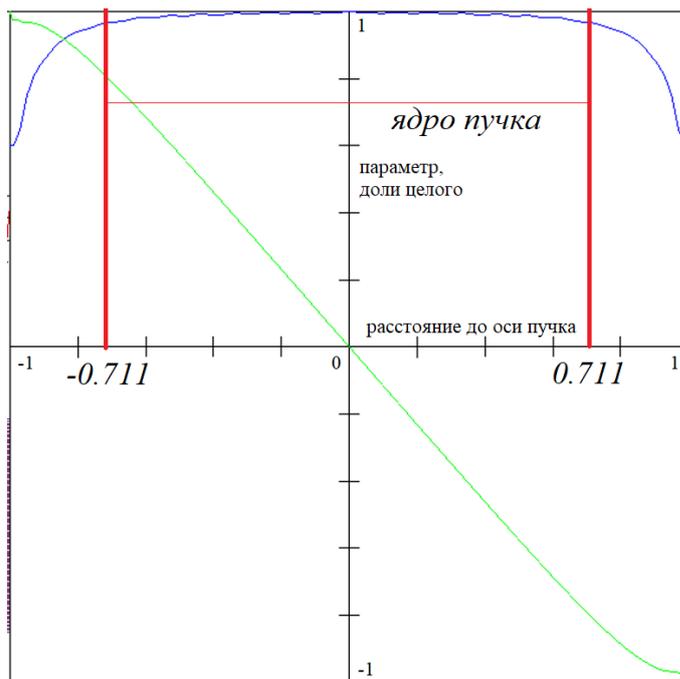


Рис. 4. Ядро пучка для схемы 2. Синим цветом обозначена плотность в долях целого
 Fig. 4. Beam core for the scheme 2. Blue line is the beam density in fractions of unit

правлением скорости и осью симметрии системы (зеленый) в долях относительно максимума. Зазубрины на краях графика плотности связаны с ошибкой вычисления и не несут физического смысла.

Как можно видеть из результатов моделирования, точное решение воссоздает распределение схемы Пирса гораздо качественнее. Модель пушки, основанная на приближенном решении, имеет явную склонность к концентрации электронной плотности в центре, а по краям плотность падает почти в два раза. Точное же решение имеет в первом приближении ту же степень однородности, что и схема Пирса. Однако если точное решение имеет едва заметную тенденцию концентрировать плотность в центре (аналогичную приближенному решению), то пирсовская пушка заметно концентрирует электроны на краях пучка. Предположительно, это связано с тем, что схема Пирса с плоским электродом идеальна лишь для ленточного пучка; цилиндрический же пучок будет терять однородность на расстояниях, заметно превышающих радиус катода.

Назовем ядром пучка область его однородности с точностью 97 % (см. рис. 4). Ядро пучка в случае схемы Пирса составляет 88 % распределения по радиусу; для схемы 3 (точного решения) это значение составляет 89 % (что даже лучше, чем схема Пирса). Ядро же схемы 2 (приближенного решения) занимает 71 % пучка вдоль радиуса. Доля полного тока в ядре пучка для схем 1, 2 и 3 составляет соответственно 77, 54 и 80 %. Относительный разброс по плотности вдоль радиуса составляет для трех схем соответственно 0,02, 0,10 и 0,01. Таким образом, приближенная схема показывает свою состоятельность для задачи формирования однородного пучка только на области, содержащей половину ее полного тока.

Выводы

Проведенное исследование показало, что возможна реализация теплового зазора в схеме Пирса с использованием альтернативного электрода в форме эквипотенциали цилиндрическо-

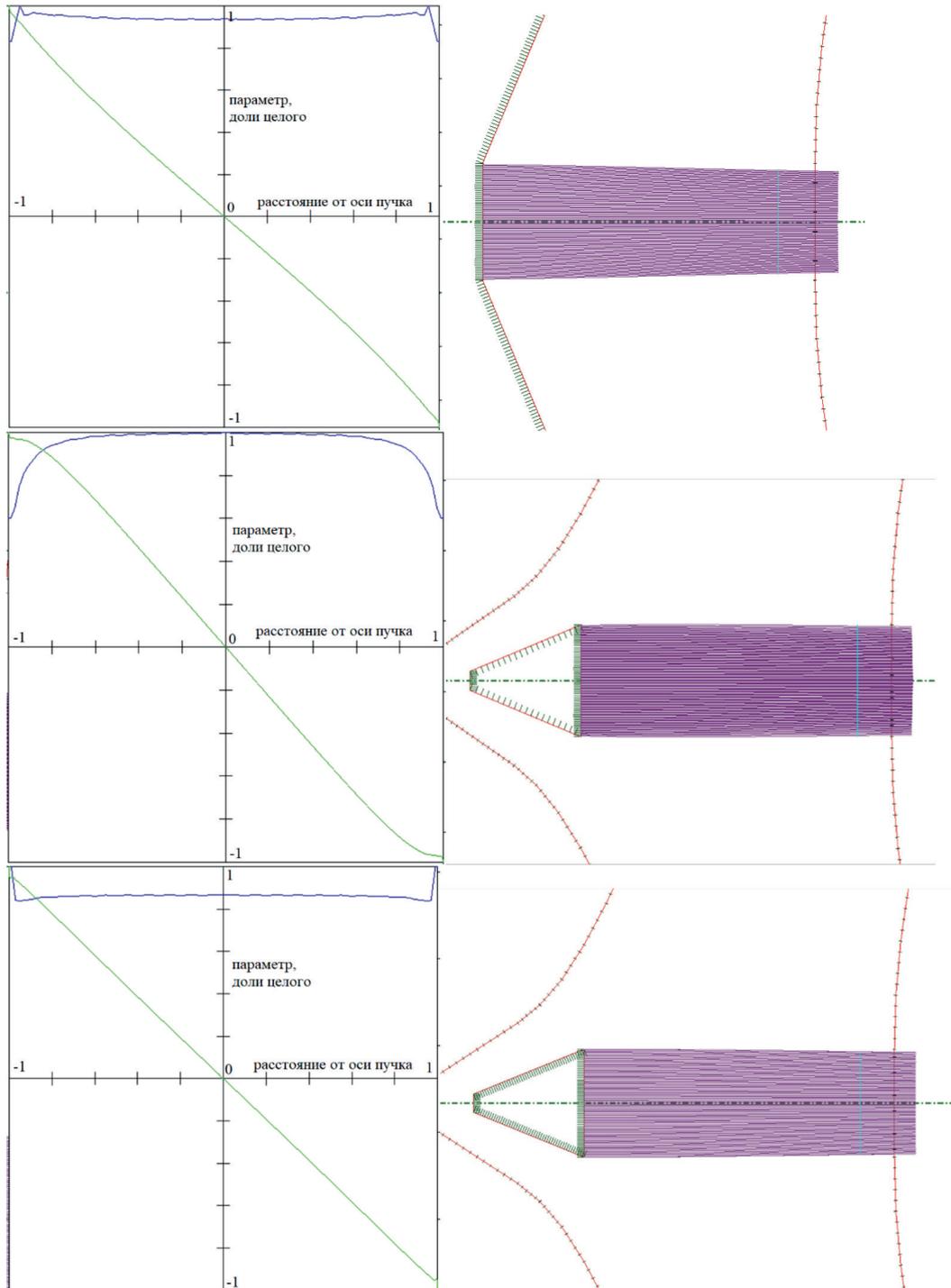


Рис. 5. Параметры пучка (слева) и траектории для трех схем: схемы Пирса, приближенного решения и точного решения. Синим цветом обозначена плотность, зеленым – угол направления скорости пучка. Параметры измерялись в сечении на расстоянии 5 мм от катода (голубая линия на рисунках справа)

Fig. 5. Beam parameters (left) and trajectories for three schemes: Pierce scheme, approximate solution and exact solution. Blue color indicates density, green color indicates the direction angle of the beam velocity. The parameters were measured in a section at a distance of 5 mm from the cathode (blue line in the figures on the right).

го пучка. Несмотря на достаточно большую сложность выражения для подобных эквипотенциалей, оно может быть решено численно с любой необходимой точностью. Моделирование траекторий в поле такого электрода показало, что однородное ядро пучка составляет 80 % полного тока в сравнении с 77 % для конического электрода Пирса и 54 % для приближенного решения на эквипотенциали. Таким образом, рассмотренный метод можно признать рабочим.

Список литературы

1. **Сыровый В. А.** Введение в теорию интенсивных пучков заряженных частиц. М.: Энергоатомиздат, 2004.
2. **Сыровый В. А.** К задаче о формировании цилиндрического электронного пучка // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52. С. 634–636.
3. **Harker K. J.** Solution of the Cauchy Problem for Laplace's Equation in Axially Symmetric Systems // J. Math. Phys. 1963. Vol. 4. P. 993.

References

1. **Syrovoy V. A.** Introduction to the theory of intense beams of charged particles. Moscow, Energoatomizdat publ., 2004. (in Russ.)
2. **Syrovoy V. A.** To the problem of the formation of a cylindrical electron beam. *Radio engineering and electronics*, 2007, vol. 52, pp. 634–636. (in Russ.)
3. **Harker K. J.** Solution of the Cauchy Problem for Laplace's Equation in Axially Symmetric Systems. *J. Math. Phys.*, 1963, vol. 4, p. 993.

Сведения об авторах

Ли Роман Викторович, магистрант

Девятайкина Татьяна Александровна, младший научный сотрудник

Никифоров Данила Алексеевич, научный сотрудник

Information about the Authors

Roman V. Li, Master Student

Tatyana A. Devyataikina, Junior Researcher

Danila A. Nikiforov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Статья поступила в редакцию 13.09.2023;

одобрена после рецензирования 25.09.2023; принята к публикации 13.12.2023

The article was submitted 13.09.2023;

approved after reviewing 25.09.2023; accepted for publication 13.12.2023

Научная статья

УДК 621.317.421.2

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-68-79

Статус измерений положения магнитной оси квадрупольных магнитов коллайдера NICA*

Илья Юрьевич Николайчук¹, Владимир Владимирович Борисов
Олег Михайлович Голубицкий, Дмитрий Александрович Золотых
Богдан Кондратьев

Объединенный институт ядерных исследований
Дубна, Россия

¹nikolajchuk@jinr.ru

Аннотация

В рамках реализации мегапроекта NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) в Лаборатории физики высоких энергий (ЛФВЭ) Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) проводится сборка магнито-криостатной системы коллайдера. Структурными единицами магнито-оптической структуры коллайдера являются 88 дипольных и 82 квадрупольных магнита различной конфигурации. С целью повышения точности юстировки квадрупольных магнитов на теоретическую замкнутую орбиту пучка в коллайдере необходимо измерить положение магнитной оси в системе координат магнита. Для проведения таких измерений в ЛФВЭ используется вибрационная струнная методика. Новая измерительная система, реализующая такую методику, разработана и введена в эксплуатацию в ЛФВЭ. Система работает при температуре окружающей среды и позволяет измерять положение магнитной оси с точностью $\pm 0,053$ мм. В статье приведена конструкция магнитометрической системы, сделана оценка точности и представлены текущие результаты измерений положения магнитной оси квадрупольных магнитов коллайдера NICA.

Ключевые слова

NICA, квадрупольный магнит, магнитная ось, вибрационная струнная методика, магнитометрическая система

Для цитирования

Николайчук И. Ю., Борисов В. В., Голубицкий О. М., Золотых Д. А., Кондратьев Б. Статус измерений положения магнитной оси квадрупольных магнитов коллайдера NICA // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 1. С. 68–79. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-68-79

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

© Николайчук И. Ю., Борисов В. В., Голубицкий О. М., Золотых Д. А., Кондратьев Б., 2024

The State of Magnetic Axis Measurement of the Nica Collider Quadrupoles

Ilia Yu. Nikolaichuk¹, Vladimir V. Borisov
Oleg M. Golubitsky, Dmitry A. Zolotykh
Bogdan Kondratiev

Joint Institute for Nuclear Research,
Dubna, Russian Federation

¹nikolajchuk@jinr.ru

Abstract

As part of the NICA megascience project the magnetic-cryostat system of the superconducting Collider is being assembled. The structural units of the Collider are 88 dipole and 82 quadrupole magnets of various configuration. In order to improve the accuracy of alignment of quadrupole magnets to the theoretical closed orbit of the beam in the Collider, it is necessary to measure the position of the magnetic axis in the coordinate system of the magnet. Vibration wire technique is used to perform such measurements in VBLHEP. The system operates at ambient temperature and allows measuring the position of the magnetic axis with an accuracy of ± 0.053 mm. The article presents the design of the magnetic measurement system, an accuracy assessment is made and the current results of measurements of the position of the magnetic axis of the NICA Collider quadrupole magnets.

Keywords

NICA, quadrupole, magnetic axis, vibrating wire technique, magnetic measurement system

For citation

Nikolaichuk I. Yu., Vorisov V. V., Golubitsky O. M., Zolotykh D. A., Kondratiev B.. The state of magnetic axis measurement of the NICA collider quadrupoles. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 1, pp. 68–79 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-68-79

Введение

Ускорительный комплекс NICA состоит из коллайдера и инжекционной цепочки ускорителей. Инжекционный комплекс введен в эксплуатацию в 2022 г. и успешно прошел четыре сеанса пусконаладочных работ. Готовность основных узлов коллайдера составляет более 80 % [1].

Магнито-криостатная система коллайдера состоит из 88 дипольных магнитов и 82 квадрупольных магнитов – 46 двухапертурных магнитов в арках, 12 двухапертурных дублетов и 12 одноапертурных магнитов финальной фокусировки. Все магниты изготавливаются и проходят испытания в ЛФВЭ ОИЯИ. Положение магнитной оси определяется для каждого магнита в модуле в системе координат модуля.

Измерение положения магнитной оси производится специально разработанной магнитометрической системой, основанной на вибрационной струнной методике. Методика заключается в регистрации механических колебаний натянутой струны, вызываемых силой Лоренца, возникающей при протекании переменного тока по струне, натянутой в статическом поле измеряемого магнита [2]. Критерием приближения струны к магнитной оси служит уменьшение амплитуды ее колебаний. Изменяя пространственное положение струны в апертуре магнита, можно определить магнитную ось как положение, при котором колебания струны минимальны.

Квадрупольный магнит коллайдера NICA

В сверхпроводящей магнитной системе коллайдера используются магниты с полем, формируемым железным ярмом, аналогичные по конструкции магнитам нуклотрона [3]. Данные магниты состоят из ярма типа «оконная рама» и обмотки, изготавливаемой из «трубчатого» сверхпроводящего кабеля на основе сплава Nb-Ti. Магниты охлаждаются двухфазным потоком

гелия до рабочей температуры 4,5 К. Как дипольные, так и квадрупольные магниты имеют возможность неоднократной сборки и замены составляющих элементов.

Максимальная величина индукции магнитного поля в магнитах составляет 1,8 Тл. Величина максимального рабочего тока составляет 10,44 кА.

Магнитометрическая система

Система измерений положения магнитной оси квадрупольных магнитов коллайдера NICA разработана, собрана и введена в эксплуатацию. Схема измерительной системы представлена на рис. 1.

Струна из бериллиевой бронзы диаметром 0,125 мм и длиной ~3 м (длина варьируется в зависимости от типа измеряемого магнита) протягивается через апертуру магнита (см. рис. 1, поз. 2) и перемещается двумя парами сервомоторов (см. рис. 1, поз. 4) в вертикальной и горизонтальной плоскостях [4]. Для измерений положения магнитной оси геометрический центр магнита должен находиться на $\frac{1}{4}$ длины струны [5]. Струна закреплена на трансляторах и натянута с усилием 10 Н. Для контроля натяжения разработана специальная система автоматического натяжения (см. рис. 1, поз. 5), состоящая из шагового двигателя и тензодатчика.

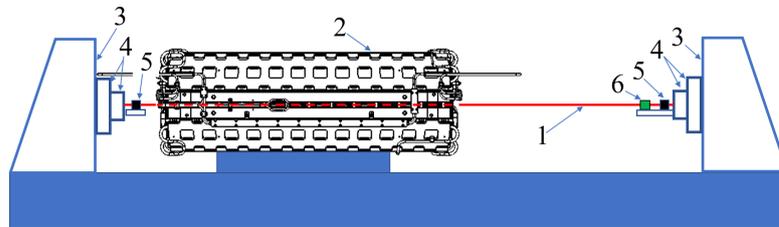


Рис. 1. Схема измерительной системы:

1 – струна; 2 – квадрупольный магнит; 3 – стойки поддержки основных узлов системы;
4 – система перемещения струны; 5 – система натяжения струны; 6 – система регистрации колебаний

Fig. 1. Measuring system setup:

1 – wire; 2 – quadrupole magnet; 3 – racks for supporting the main components of the system;
4 – movement system; 5 – tension system; 6 – vibration measurement system

Система регистрации колебаний

Система регистрации колебаний струны состоит из двух оптопар GP1S094HCZ0F [6], расположенных ортогонально, и линейных платформ для их автоматического перемещения (рис. 2, а).

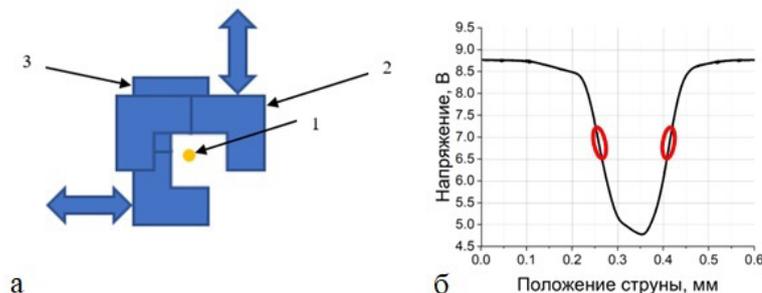


Рис. 2. Схема системы регистрации колебаний струны:

1 – струна; 2 – оптопара для регистрации вертикальных колебаний; 3 – оптопара для регистрации горизонтальных колебаний (а); зависимость напряжения на выходе оптопары от положения струны (б)

Fig. 2. Vibration measurement system setup: 1 – wire, 2 – optocouple for vertical vibration, 3 – optocouple for horizontal vibration (а); dependence of voltage at the optocouple output on the string position (б)

Оптопара состоит из инфракрасного светодиода и фототранзистора, разделенных промежутком в 3 мм. При попадании струны в промежуток напряжение на выходе оптопары снижается в зависимости от перекрытия струной светового потока светодиода. Зависимость напряжения на фототранзисторе от положения струны показана на рис. 2, б. Красным выделена рабочая область детектирования колебаний струны. Рабочая область выбирается эмпирически по средней величине напряжения между позициями максимального и минимального перекрытия светового потока светодиода. Это необходимо для сохранения линейной зависимости между амплитудой колебаний струны и напряжением на выходе оптопары.

Система перемещения оптопар автоматически изменяет положение оптопар относительно струны для сохранения линейной области работы. Выход струны из рабочей области связан с ее перемещением при измерениях.

Проведение измерений

Магнитные измерения

После подготовки системы к измерениям в первую очередь находится резонансная частота собственных колебаний струны [5]. Для этого измеряется зависимость амплитуды колебаний струны от частоты переменного тока в ней.

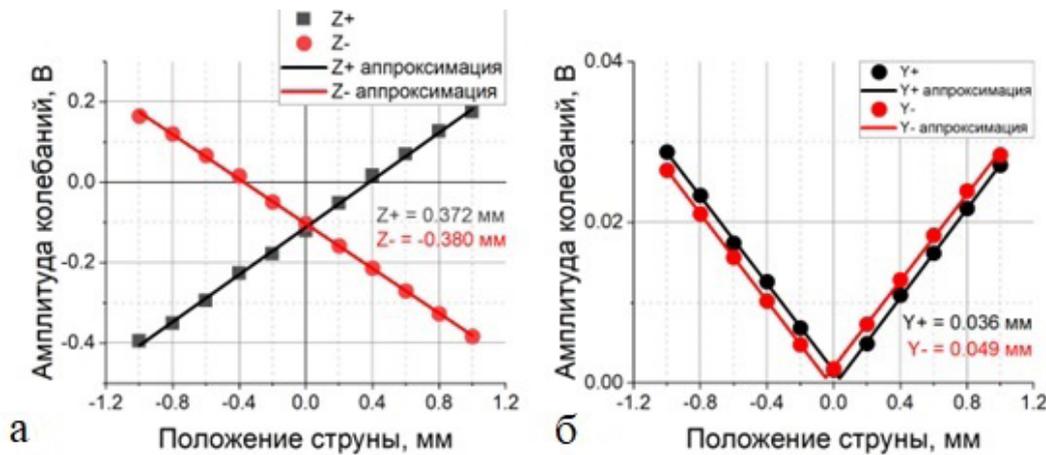


Рис. 3. Зависимость амплитуды колебаний струны от положения при измерении положения магнитного центра (а) и при измерении угловых положений магнитной оси (б)

Fig. 3. Amplitude of the wire vibration vs position when measuring magnetic center (a) and when measuring angle position of magnetic axis (b)

После нахождения резонансной частоты производятся измерения положения магнитного центра. Магнитный центр – это точка пересечения магнитной оси с поперечной плоскостью магнита в его геометрическом центре. Частота переменного тока в струне устанавливается кратной резонансной частоте собственных колебаний. Кратность определяется продольным положением магнита ($\frac{1}{2}$ или $\frac{1}{4}$ длины струны). Измерения проводятся в двух полярностях тока питания магнита для вычета вклада внешних магнитных полей и остаточной намагниченности. Концы струны перемещаются сонаправлено в одной из измеряемых плоскостей (вертикальной или горизонтальной). Область измерений и шаг задаются оператором в программе управления. По измеренным точкам производится построение зависимостей амплитуды колебаний от положения струны. Зависимость амплитуды колебаний струны от величины магнитного поля является линейной, что позволяет аппроксимировать измеренные точки линейной

функцией. Магнитным центром при измерениях принимается точка пересечения построенных зависимостей (рис. 3, а).

После определения положения магнитного центра измеряются угловые положения магнитной оси в вертикальной (Pitch) и горизонтальной (Yaw) плоскостях. Для этого точки крепления струны перемещаются в противоположных направлениях так, чтобы положение струны в центре магнита оставалось неизменным.

Измерения также проводятся в двух полярностях. Измеряемые зависимости аппроксимируются кривой вида $y = |x|$ (рис. 3, б). Угловым положением магнитной оси принимается среднее между измерениями в двух полярностях.

Геометрические измерения

После выставления струны в магнитную ось необходимо перенести координаты струны в систему координат магнита. Для построения системы координат используются реперные отверстия на ярме магнита (рис. 4).

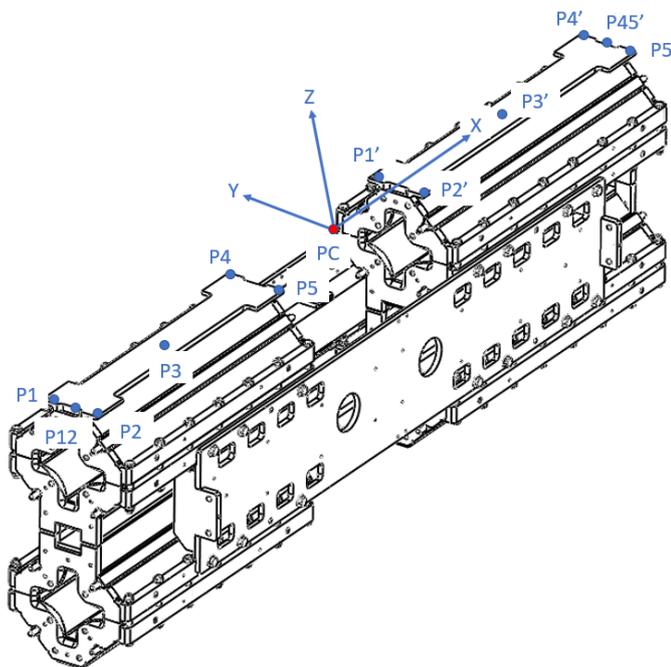


Рис. 4. Система координат двухапертурного дублета квадрупольных магнитов

Fig. 4. Coordinate system of twin-aperture doublet of quadrupole magnet

Измерение реперных точек магнита и положения струны производится координатно-измерительной машиной [7].

Программное обеспечение

Программное обеспечение для проведения измерений разработано в среде LabVIEW 2020 [8]. Созданное ПО позволяет проводить измерения в полуавтоматическом режиме с возможностью удаленного управления и мониторинга. В программе управления реализованы автоматический поиск резонансной частоты колебаний струны и поиск положения магнитной оси (рис. 5).

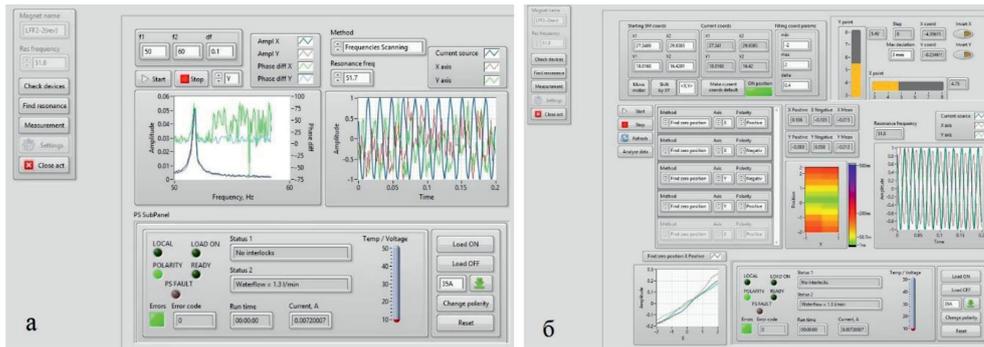


Рис. 5. Интерфейс пользователя программного обеспечения для измерений резонансной частоты колебаний струны (а) и поиска положения магнитной оси (б)

Fig. 5. Software user interface for measuring resonance frequency (a) and find position of magnetic axis (b)

Оценка точности измерений

Стандартная ошибка измерений складывается из точности магнитных измерений и точности координатно-измерительной машины при переносе координат струны в систему координат магнита. Точность магнитных измерений может быть оценена по ошибке аппроксимации экспериментальных данных (рис. 6–7) и повторяемости измерений (рис. 8–9).

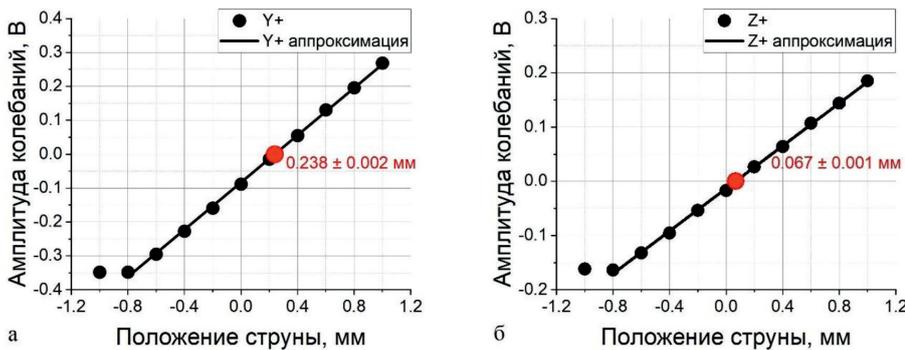


Рис. 6. Зависимость амплитуды колебаний от перемещения струны при измерении положения магнитного центра в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскостях

Fig. 6. Amplitude of the wire vibration vs position when measuring magnetic center in horizontal (a) and vertical (b) planes

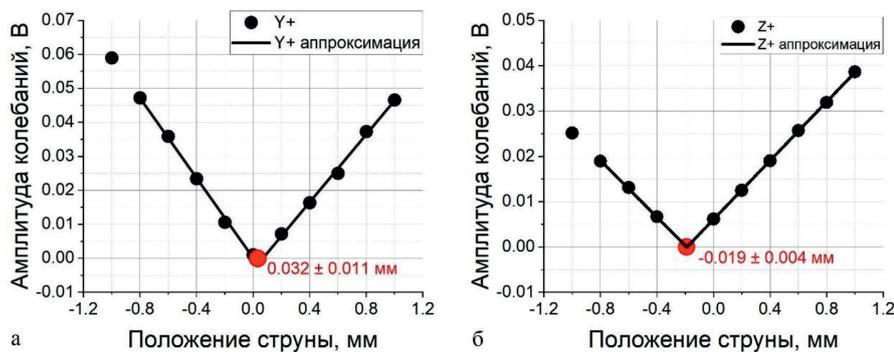


Рис. 7. Зависимость амплитуды колебаний от перемещения струны при измерении угловых положений магнитной оси в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскостях

Fig. 7. Amplitude of the wire vibration vs position when measuring angle position of magnetic axis in horizontal (a) and vertical (b) planes

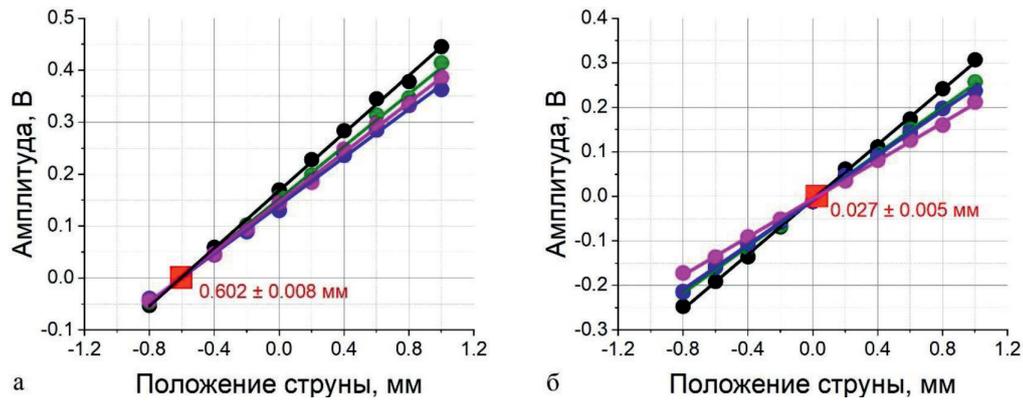


Рис. 8. Повторяемость измерений положения магнитного центра в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскостях

Fig. 8. Measurement repeatability of magnetic center in horizontal (a) and vertical (b) planes

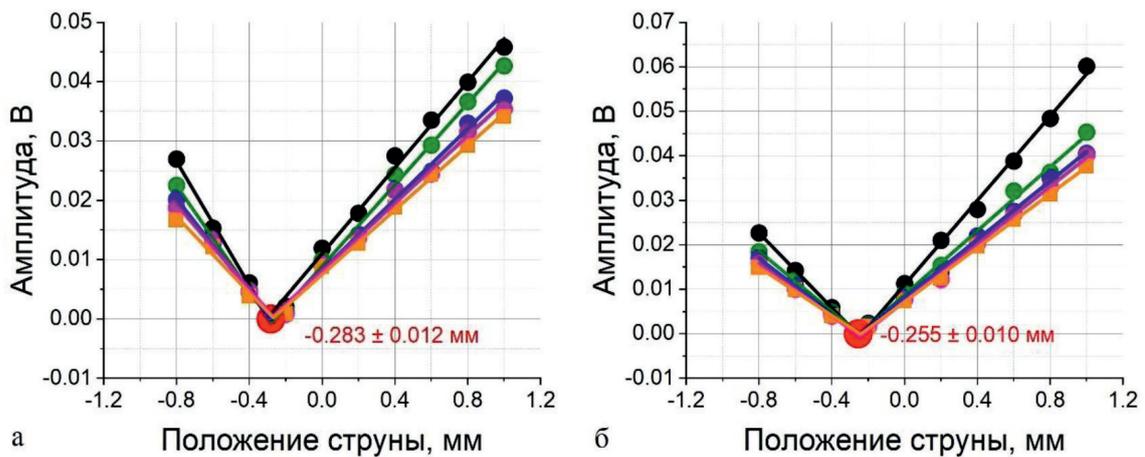


Рис. 9. Повторяемость измерений угловых положений магнитной оси в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскостях

Fig. 9. Measurement repeatability of angle positions of magnetic axis in horizontal (a) and vertical (b) planes

Ошибка привязки положения струны к системе координат определяется пространственной точностью измерений координатно-измерительной машины ($\pm 0,051$ мм). Для оценки повторяемости была проведена серия из 7 измерений положения магнитного центра (M) и угловых положений (Pitch, Yaw). Результаты представлены в таблице.

Результаты измерений

На текущий момент положение магнитной оси измерено для всех двухпертурных магнитов и дублетов. Основные результаты измерений приведены на рис. 10–15.

Повторяемость геометрических измерений
Geometric measurements repeatability

№	M_y , мм	M_z , мм	Pitch, мрад	Yaw, мрад
1	0,05	-242,01	-0,33	-0,04
2	0,00	-242,11	-0,35	-0,03
3	0,06	-242,09	-0,37	-0,03
4	0,04	-242,09	-0,36	-0,03
5	0,02	-242,12	-0,35	-0,03
6	-0,01	-242,12	-0,34	-0,03
7	0,03	-242,08	-0,32	-0,03
Ср. знач.	0,03	-242,09	-0,35	-0,03
Ст. откл.	0,03	0,04	0,02	0,01

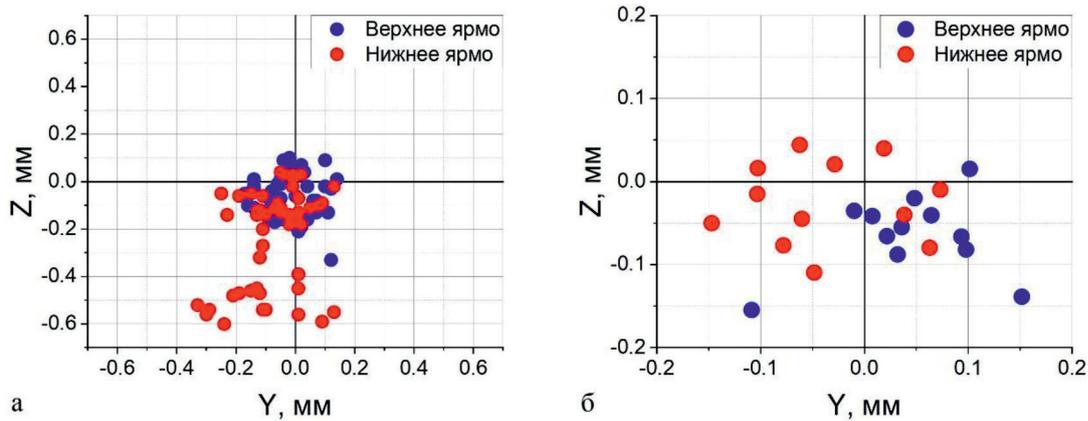


Рис. 10. Положения магнитных центров квадрупольных магнитов арки (а) и дублетов (б)
Fig. 10. Positions of magnetic center of arch quadrupole magnets (a) and doublets (b)

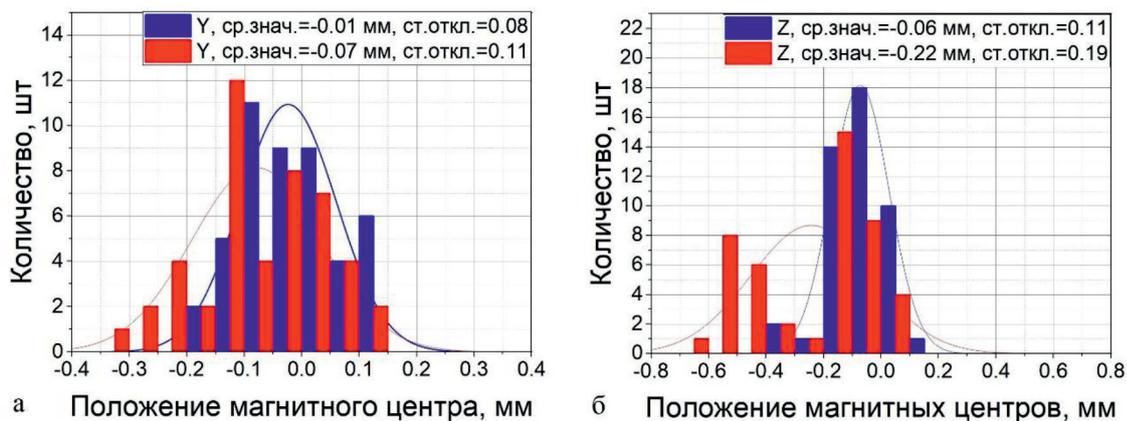


Рис. 11. Распределения положений магнитных центров квадрупольных магнитов арки
в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскостях
Fig. 11. Distributions of magnetic center positions in arch quadrupoles
in horizontal (a) and vertical (b) planes

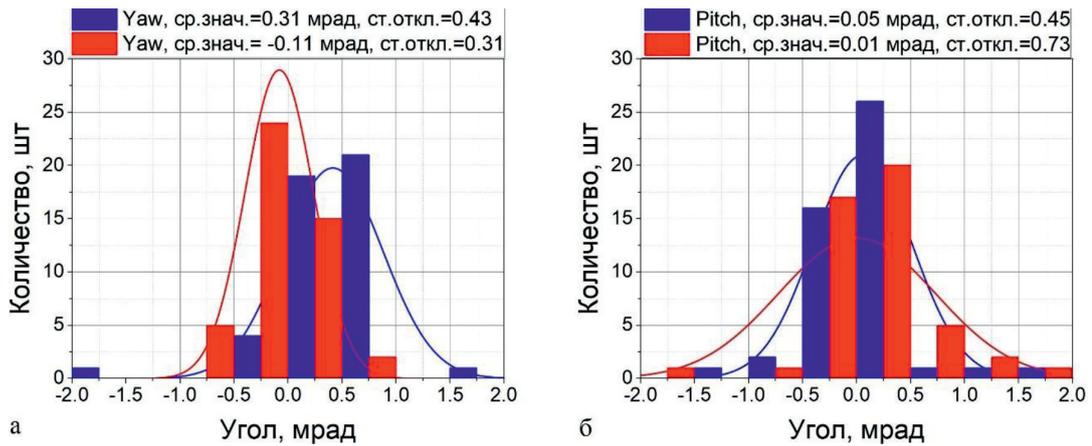


Рис. 12. Распределения угловых положений магнитной оси квадрупольных магнитов арки в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскостях

Fig. 12. Distributions of angle positions of magnetic axis in arch quadrupoles in horizontal (a) and vertical (b) planes

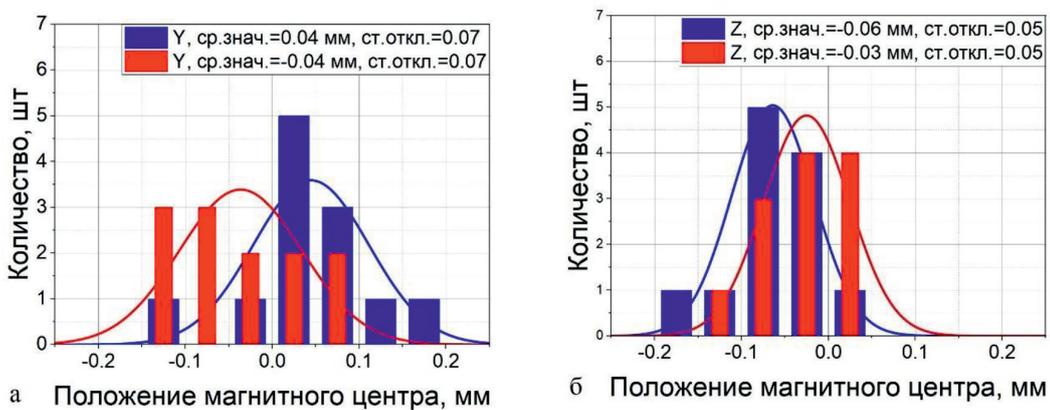


Рис. 13. Распределения положений магнитных центров двухапертурных дублетов в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскостях

Fig. 13. Distributions of magnetic center positions in twin-aperture doublets in horizontal (a) and vertical (b) planes

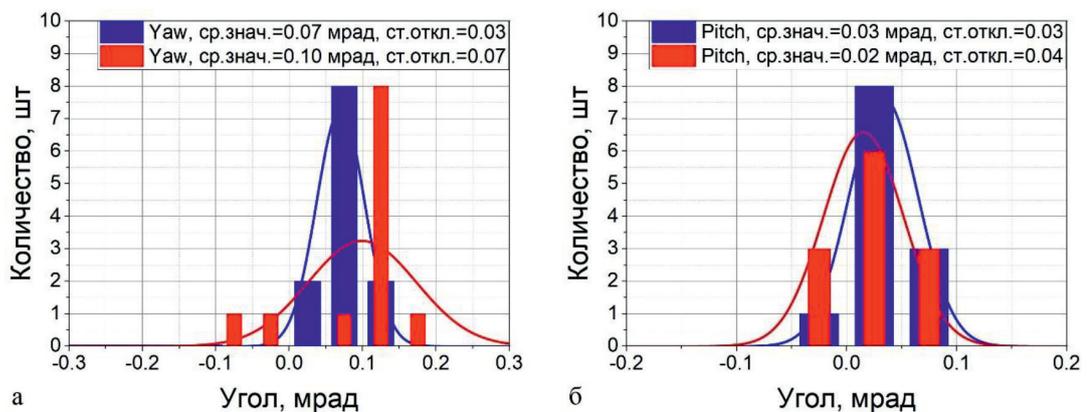


Рис. 14. Распределения угловых положений магнитной оси двухапертурных дублетов в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскостях

Fig. 14. Distributions of angle positions of magnetic axis in twin-aperture doublets in horizontal (a) and vertical (b) planes

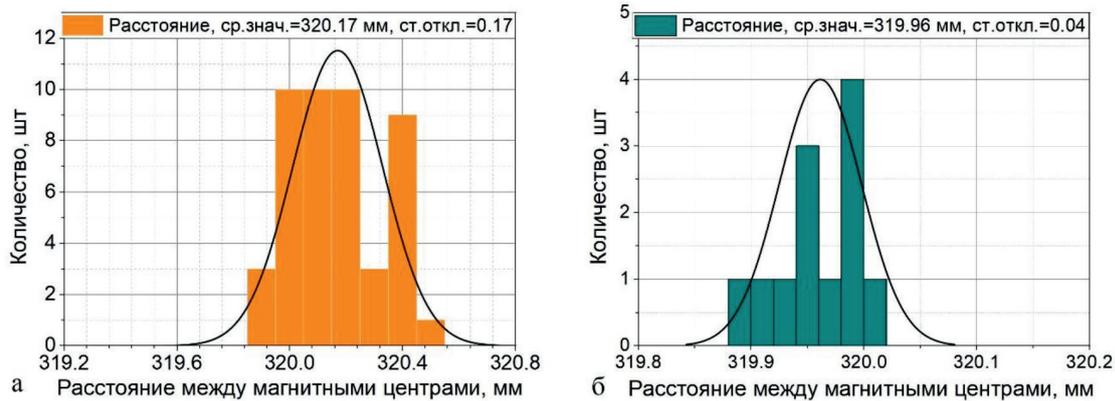


Рис. 15. Расстояния между магнитными центрами квадрупольных магнитов арки (а) и дублетов (б)
 Fig. 15. Distance between magnetic centers in arch quadrupoles (a) and doublets (b)

Положения магнитных центров и углов приведены как отклонения от геометрической оси магнита. Результаты измерений положения магнитной оси квадрупольных магнитов арок показывают наличие разброса положений магнитной оси, превышающего точность магнитометрической системы. Это объясняется отклонением в магнитных свойствах материалов лобовых пластин, что также было замечено при измерениях интеграла магнитного поля [9].

Заключение

Методика вибрирующей струны является высокоточным методом измерений положения магнитной оси. Данный метод был успешно применен при измерениях положения магнитной оси дублетов квадрупольных магнитов бустерного синхротрона комплекса NICA [10]. Полученный опыт был учтен при разработке измерительного стенда для квадрупольных магнитов коллайдера.

Оценка точности измерений положения магнитной оси показывает, что в данной конфигурации магнитометрической системы и координатно-измерительной машины точность достигает $\pm 0,053$ мм. Основной вклад в погрешность измерений положения магнитной оси вносит точность измерений координатно-измерительной машины. Повышение точности измерений возможно при использовании координатно-измерительной машины с лучшей точностью определения пространственного положения точек. В дальнейшем предполагается реализация в созданной измерительной системе других методик измерений магнитного поля при помощи струны [11; 12].

Список литературы

1. Козлов О. С. и др. Актуальные задачи исследования динамики пучка в коллайдере NICA // ЭЧАЯ. 2022. Т. 53, № 5. С. 1220–1273.
2. Wolf Z. A vibrating wire system for quadrupole fiducialization // SLAC TN 10 087. 2010.
3. Khodzhbagiyani H., Smirnov A. The Concept of a Superconducting Magnet System for the Nuclotron // Proc. of Conf. ©ICIC 12. Southampton, 2012.
4. Николайчук И. Ю. и др. Первые измерения магнитной оси квадрупольных магнитов коллайдера NICA // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, № 6 (251). С. 1463–1469.
5. Temnykh A. The Magnetic Center Finding using Vibrating Wire Technique. Preprint CBN 99-22.
6. Reference manual. GP1S094HCZ0F Compact Transmissive Photointerrupter. SHARP Corporation, 2005.

7. Romer Absolute Arm advanced portable 3D measurement. Hexagon AB, 2017.
8. Upgrading LabVIEW. National Instruments Corporation, 2023.
9. **Золотых Д. А. и др.** Серийные магнитные измерения структурных квадрупольных магнитов коллайдера NICA // XXVIII International Conference Russian Particle Accelerators Conference RuPAC'23. Novosibirsk, Russia, 2023.
10. **Parfyo T. et al.** Vibrating wire system for fiducialization NICA Booster superconducting quadrupole magnets // *Proc. of the 27th Russ. Part. Accel. Conf. (RUPAC'21)*. Alushta, Russia, 2021. P. 379–382. DOI:10.18429/JACoW-RuPAC2021-WEPS17
11. **Petrone C.** Wire methods for measuring field harmonics, gradients and magnetic axes in accelerator magnets. PhD Thesis, CERN-THESIS-2013-130, 2013.
12. **Le Bec G.** Stretched wire measurement of multipole accelerator magnets // *Physical review special topics*. 2012. Т. 15, № 022401. P. 1–14.

References

1. **Kozlov O. S. et al.** Actual Tasks of Beam Dynamics Analysis in the NICA Collider. *PEPAN*, 2022, vol. 53, № 5, pp. 1220–1273. (in Russ.)
2. **Wolf Z.** A vibrating wire system for quadrupole fiducialization. SLAC TN 10 087, 2010.
3. **Khodzhbagiyani H., Smirnov A.** The Concept of a Superconducting Magnet System for the Nuclotron. *Proc. of Conf. ©ICIC 12*, Southampton, 2012.
4. **Nikolaichuk I. Yu. et al.** First Measurements of the Magnetic Axis of Quadrupole Magnets for the NICA Collider. *PEPAN Letters*, 2023, vol. 20, № 6(251), pp. 1425-1428. (in Russ.)
5. **Temnykh A.** The Magnetic Center Finding using Vibrating Wire Technique. Preprint CBN 99-22.
6. Reference manual. GP1S094HCZ0F Compact Transmissive Photointerrupter. SHARP Corporation, 2005.
7. Romer Absolute Arm advanced portable 3D measurement. Hexagon AB, 2017.
8. Upgrading LabVIEW. National Instruments Corporation, 2023.
9. **Zolotykh D. A. et al.** Serial magnetic measurements of the NICA Collider regular quadrupoles. *XXVIII International Conference Russian Particle Accelerators Conference RuPAC'23*, Novosibirsk, Russia, 2023. (in Russ.)
10. **Parfyo T. et al.** Vibrating wire system for fiducialization NICA Booster superconducting quadrupole magnets. In *Proc. of the 27th Russ. Part. Accel. Conf. (RUPAC'21)*, Alushta, Russia, 2021, pp. 379–382. DOI: 10.18429/JACoW-RuPAC2021-WEPS17
11. **Petrone C.** Wire methods for measuring field harmonics, gradients and magnetic axes in accelerator magnets. PhD Thesis, CERN-THESIS-2013-130, 2013.
12. **Le Bec G.** Stretched wire measurement of multipole accelerator magnets. *Physical Review Special Topics*, 2012, vol. 15, № 022401, pp. 1–14.

Сведения об авторах

Николайчук Илья Юрьевич, инженер

Борисов Владимир Владимирович, начальник сектора

Голубицкий Олег Михайлович, ведущий инженер

Золотых Дмитрий Александрович, старший инженер

Кондратьев Богдан, старший инженер

Information about the Authors

Ilya Yu. Nikolaichuk, Engineer

Vladimir V. Borisov, Head of Sector

Oleg M. Golubitsky, Principal Engineer

Dmitry A. Zolotikh, Senior Engineer

Bogdan Kondratiev, Senior Engineer

*Статья поступила в редакцию 08.09.2023;
одобрена после рецензирования 11.12.2023; принята к публикации 04.03.2024*

*The article was submitted 08.09.2023;
approved after reviewing 11.12.2023; accepted for publication 04.03.2024*

Научная статья

УДК 532.526.4 + 533.15 + 533.696.5 + 532.522.2

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-80-88

К вопросу о визуализации течения в области вдува воздуха через перфорированный участок поверхности тела вращения

Владимир Иванович Корнилов¹, Андрей Александрович Пивоваров²
Анатолий Николаевич Попков³

¹⁻³Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН

Новосибирск, Россия

¹kornilov@itam.nsc.ru

²pivovarov@itam.nsc.ru

³popkov@itam.nsc.ru

Аннотация

Представлены результаты визуализации пристенного турбулентного течения при вдуве воздуха варьируемой интенсивности через перфорированный участок поверхности на осесимметричном теле удлинением 25,3 в условиях его обтекания несжимаемым потоком. Показано, что использование метода лазерного ножа с засевом потока светорассеивающими частицами размером 1–2 мкм, сформированными из смеси на основе воды, в состав которой входит полигликоль, позволяет визуализировать структурные элементы пристенной области течения, технически трудно выявляемые традиционными методами измерений.

Ключевые слова

тело вращения, вдув воздуха, визуализация потока, лазерный нож

Источник финансирования

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (Проект № 22-29-00003). Эксперименты выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Механика» ИТПМ СО РАН.

Для цитирования

Корнилов В. И., Пивоваров А. А., Попков А. Н. К вопросу о визуализации течения в области вдува воздуха через перфорированный участок поверхности тела вращения // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 1. С. 80–88. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-80-88

Towards Flow Visualization in the Region of Air Blowing through the Perforated Section of a Body of Revolution

Vladimir I. Kornilov¹, Andrey A. Pivovarov²
Anatoly N. Popkov³

¹⁻³Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

¹kornilov@itam.nsc.ru

²pivovarov@itam.nsc.ru

³popkov@itam.nsc.ru

Abstract

The results of visualization of a near-wall turbulent flow with air blowing of various intensity through a perforated surface area on an axisymmetric body with an aspect ratio of 25.3 under conditions of an incompressible flow around are presented. It is shown that the use of the laser knife method with seeding the flow with light-scattering particles 1–2 μm in size, formed from a water-based mixture that includes polyglycol, makes it possible to visualize the structural elements of the near-wall flow region, which are technically difficult to detect by traditional measurement methods.

Keywords

body of revolution, air blowing, flow visualization, laser knife

Funding

The research was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 22-29-00003). The study was conducted at the Equipment Sharing Center «Mechanics» of ITAM SB RAS.

For citation

Towards Flow Visualization in the Region of Air Blowing Through the Perforated Section of a Body of Revolution. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 1, pp. 80–88 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-80-88

Введение

Инжекция (вдув) газа через проницаемую поверхность обтекаемого тела является одним из привлекательных методов управления турбулентным пограничным слоем (ПС), использующихся в настоящее время в аэродинамике дозвуковых течений [1–10]. С появлением новых технологий создания современных проницаемых, прежде всего мелкоперфорированных, материалов возможности управляемого вдува существенно возросли. Однако, несмотря на имеющиеся в настоящее время впечатляющие экспериментальные и расчетные данные, структура пристенного течения в области вдува остается не вполне ясной, и, за исключением относительно простых случаев, точные ее предсказания по-прежнему затруднительны. Особенно остро этот вопрос стоит при обтекании тела вращения большого удлинения, где возникает ряд особенностей, затрудняющих эффективное применение данного метода управления [11]. В этом случае существенным подспорьем могли бы стать подходящие для этой цели методы визуализации такого течения. Однако выбор эффективных методов, обзор которых представлен в [12], применительно к пристенной области течения весьма ограничен. Например, известный метод визуализации предельных линий тока, основанный на использовании смеси, в простейшем случае состоящей из основы (трансформаторное или иное масло) и пигмента (газовая сажа, диоксид титана и др.), не годится в принципе из-за опасности загрязнения микроотверстий. По этой же причине вызывает сомнение использование жидкокристаллической термографии или сублимирующих и бароиндикаторных покрытий.

Авторам известна единственная работа [13], посвященная визуализации течения в области вдува, в которой для регистрации изображения в рассеянном на микрочастицах свете, использовался плоский световой нож. Эксперименты выполнены на плоской пластине, расположенной в канале, рабочей жидкостью которого является машинное масло или глицерино-водная

смесь и, как видно, характеризуются весьма специфическими условиями, существенно отличающимися от настоящих. С учетом отмеченного более предпочтительным в данной ситуации представляется использование метода дымовых струй. Проблема состоит в том, что в «чистой» аэродинамической трубе (АТ) Т-324 ИТПМ СО РАН любая визуализация, требующая засева потока микрочастицами, особенно табачным дымом, по существу исключена. Заметим, однако, что понятие «дым» является более широким, поскольку в качестве трассеров, которые делают картину течения видимой, используют не только частицы, образующиеся в процессе горения, но и водяной пар, туман, различные аэрозоли и другие видимые частицы. В настоящей работе сделана попытка реализации такого подхода. Данные [14], полученные в пристенной области течения с использованием цифровой трассерной визуализации, показывают, что в принципе это возможно.

1. Методика эксперимента и численного расчета

Опыты проводились в дозвуковой АТ Т-324 ИТПМ СО РАН с размерами рабочей части $1 \times 1 \times 4$ м при двух режимных скоростях потока $U_\infty = 6,5$ и 15 м/с, что соответствовало значению числа Рейнольдса Re_L , вычисленному по длине модели L , равному, соответственно, $1,65 \cdot 10^6$ и $3,81 \cdot 10^6$. В качестве объекта исследования использовалась модель удлиненного осесимметричного тела (УОТ) (рис. 1) длиной $L = 2530,9$ мм, установленная в рабочей части АТ на пилоне с помощью хвостовой державки. Модель состоит из головной части, представляющей собой эллипсоид вращения с большой полуосью 300 мм, цилиндрического участка диаметром 100 мм, длиной 1976,9 мм, и хвостовой части, контур которой описывается соотношением $r/r_{\text{цил}} = [1 - (x_{\text{хв}}/l_{\text{хв}})^2]^{0,9}$, где $l_{\text{хв}}$ – длина хвостовой части, $x_{\text{хв}}$ – продольная координата, отсчитываемая от сечения сопряжения хвостовой и цилиндрической частей УОТ. Вдоль одной из образующих УОТ расположено 17 приемников давления диаметром 0,4 мм. Чтобы обеспечить развитое турбулентное течение на большей части модели, ПС был искусственно турбулизован путем установки кольца из прутка диаметром 0,8 мм и самоклеящейся противоскользкой ленты средней зернистости высотой $h = 0,6$ мм и длиной 25 мм, установленных в месте сопряжения головной части и цилиндрического участка. Для организации распределенного вдува воздуха смонтирована заделанная заподлицо с основной поверхностью УОТ цилиндрическая перфорированная секция длиной 120 мм ($\Delta l/L = 0,0474$), передняя граница которой располагалась на расстоянии 904,4 мм ($x/L = 0,357$) от носка УОТ. Использовался перфорированный материал со средним диаметром расположенных в шахматном порядке отверстий, равным 0,165 мм, а соотношение между длиной микроканалов и диаметром отверстий $t/d = 2,5$.

Чтобы выявить особенности формирования структуры течения в ПС УОТ при наличии распределенного вдува через перфорированный участок поверхности, применялась методика визуализации течения методом лазерного ножа. Схема визуализации (рис. 2) включает непрерывный твердотельный лазер с диодной накачкой длиной волны излучения 532 нм и мощностью 200 мВт, закрепленный на подвеске с возможностью регулировки на потолке рабочей части трубы, цифровую камеру DO3THINK GX2500 с высоким пространственным разрешением (5120×5120 пикселей), установленную перед смотровым окном АТ, и генератор Martin Magnum 550 с дополнительным контейнером для засева потока светорассеивающими микрочастицами размером 1–2 мкм, расположенный на противоположной стороне АТ. Рабочей жидкостью генератора является смесь на основе воды, в состав которой входит полигликоль. Инъекция светорассеивающих частиц в рабочую область осуществлялась с помощью телескопической подводной трубки, конечный участок которой крепился на миниатюрной вертикальной стойке, установленной на потолке рабочей части АТ. Положение выходного сечения трубки могло в широких пределах регулироваться в плоскости лазерного ножа как по высоте исследуемой области, так и по длине УОТ.

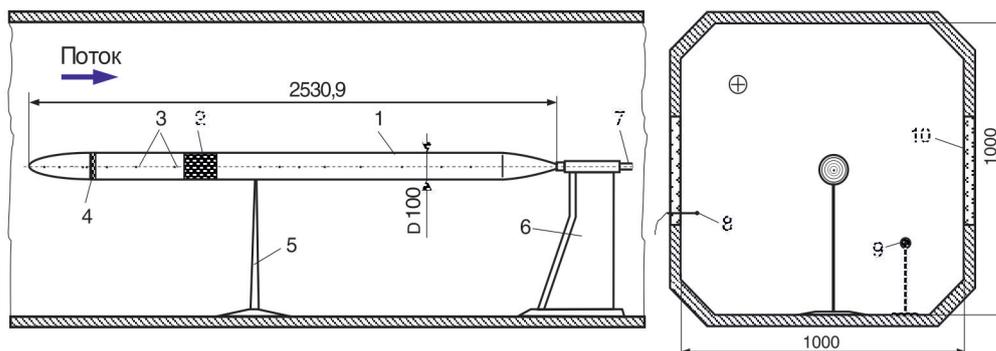


Рис. 1. Модель тела вращения и схема ее размещения в рабочей части АТ (не в масштабе): 1 – тело вращения; 2 – секция вдува воздуха; 3 – приемники давления; 4 – турбулизатор ПС; 5 – дополнительная стойка; 6 – пилон; 7 – магистраль подвода воздуха; 8 – термопара; 9 – трубка Пито-статики; 10 – смотровое окно. Размеры – в миллиметрах

Fig. 1. Model of the body of revolution and scheme its arrangement in wind tunnel-test section (not to scale): 1 – body of revolution; 2 – air injection section; 3 – pressure taps; 4 – boundary-layer tripping device; 5 – strut; 6 – pylon; 7 – air supply pipeline; 8 – thermocouple; 9 – Pitot-static tube; 10 – observation window. Sizes are in millimeters

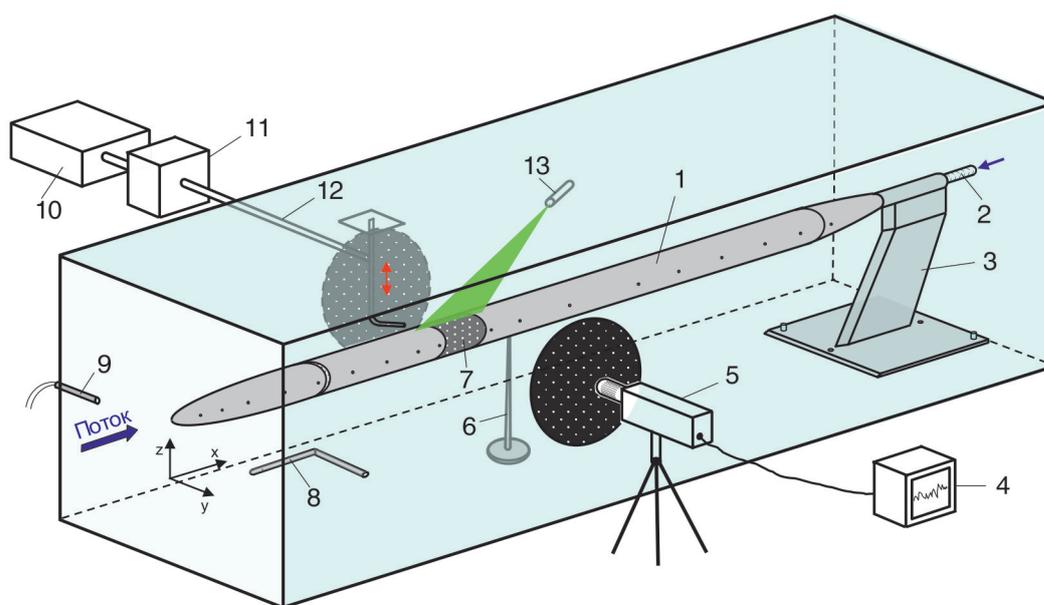


Рис. 2. Схема визуализации ПС на теле вращения в условиях вдува воздуха через перфорированную поверхность: 1 – тело вращения; 2 – магистраль подвода воздуха; 3 – пилон; 4 – компьютер; 5 – цифровая камера DO3THINK GX2500; 6 – дополнительная стойка; 7 – секция вдува воздуха; 8 – трубка Пито-статики; 9 – термопара; 10 – генератор микрочастиц Martin Magnum 550; 11 – контейнер; 12 – трубка подвода микрочастиц в исследуемую область; 13 – лазер с системой линз

Fig. 2. Scheme of boundary-layer visualization on the body of revolution under condition of air blowing through perforated surface: 1 – body of revolution; 2 – air supply pipeline; 3 – pylon; 4 – computer; 5 – digital camera DO3THINK GX2500; 6 – strut; 7 – air injection section; 8 – Pitot-static tube; 9 – thermocouple; 10 – microparticle generator Martin Magnum 550; 11 – container; 12 – tube for supplying microparticles into the studied area; 13 – laser with lens system

Возможно, более приемлемым способом подвода микрочастиц было бы использование для этой цели магистрали подвода воздуха УОТ. Однако наличие мелкоячеистой подложки,

расположенной непосредственно под перфорированной поверхностью со стороны камеры давления, не позволило получить на выходе необходимую концентрацию частиц.

Эксперименты показали, что засев потока светорассеивающими частицами указанных размеров, сформированными из смеси на основе воды, в состав которой входит полигликоль, практически не загрязняет поток.

Численное решение задачи осуществлялось в рамках осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса (RANS) в предположении стационарного, несжимаемого турбулентного потока воздуха. Для замыкания системы уравнений использовалась $k-\omega$ -модель турбулентности. С целью разрешения вязкого подслоя применялась версия низкорейнольдсовой модели турбулентности (Low-Re Stress-Omega). Как известно, в этом случае важно, чтобы для безразмерного расстояния от центра первой пристеночной ячейки до стенки было выполнено условие $y_1^+ \leq 1$ [15]. Данное требование, безусловно, соблюдалось.

Расчетная область имела С-топологию и ее основные размеры определялись поперечным размером рабочей части АТ, равным $5D$, и продольным размером, равным $29D$ (в осевом направлении), где D – диаметр цилиндрической части УОТ. Внутри этой области строилась четырехугольная сетка, сгущение которой по мере приближения к поверхности УОТ выбиралось исходя из обеспечения указанного выше условия высоты пристенных ячеек. Следуя принятой в ANSYS Fluent формализации, на входной границе задавался однородный профиль скорости, соответственно, для продольной $V_x = U_\infty$ и нормальной $V_y = 0$ компонент. Значение характеристик турбулентности, соответствующее отношению турбулентной и молекулярной вязкости ν_t/ν , принято равным единице, а интенсивность турбулентности – $Tu = 0,05\%$. На стенке (нижняя граница) задавалось условие прилипания, а на свободной верхней границе – условие симметрии. На выходной границе задавался постоянный уровень относительного давления $P = 0$.

Допустимые максимальные остаточные значения невязок для всех моделируемых переменных выбирались равными $\varepsilon = 10^{-8}$. Общее количество узлов в окрестности перфорированного участка – порядка 50 000.

2. Результаты

Хотя метод лазерного ножа считается одним из наиболее информативных методов визуализации течения, ясно, что этапу непосредственных измерений должна предшествовать тщательная настройка оптической системы. Это особенно важно для дозвуковых течений, которые, как правило, характеризуются невысокими значениями градиентов плотности потока. При качественной настройке и строгой ориентации плоскости лазерного ножа вдоль оси симметрии УОТ удастся наблюдать отчетливые структурные особенности потока, такие как форма течения (ламинарное или турбулентное), характерные неоднородности потока, формирование вихрей и их масштаб, отрыв потока и др. Подтверждением этому является рис. 3, на котором показана

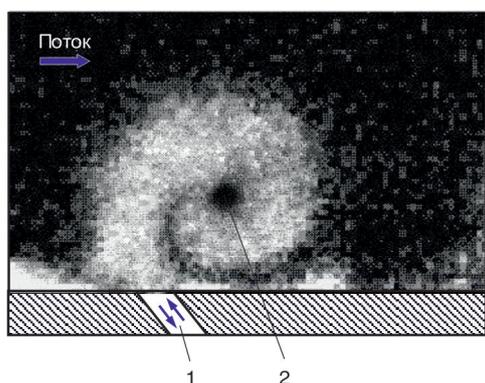


Рис. 3. Визуализация вихревого движения, формирующегося при периодическом воздействии воздуха через кольцевую щель в стенке УОТ: 1 – синтетическая струя; 2 – ядро вихря

Fig. 3. Visualization of the vortex motion formed at the periodic air forcing through an annular slot in the wall of the body of revolution: 1 – synthetic jet; 2 – vortex core



Рис. 4. Типичная визуализация пристенной области течения при наличии вдува через перфорированную поверхность
 Fig. 4. Typical visualization of the near-wall flow region at the presence of air blowing through perforated surface

фотография визуализации вихревого движения, инициированного периодическим воздействием (синтетическая струя) через наклонную кольцевую щель в стенке УОТ и формирующегося в результате взаимодействия струи с набегающим турбулентным сдвиговым потоком. Можно отчетливо видеть не только ядро вихря, но и спиральную часть вихря с направлением вращения по часовой стрелке. Механизм возникновения вихря состоит в следующем. На фазе вдува набегающий сдвиговый поток временно блокируется струйным движением, направленным от стенки. Это приводит к резкому уменьшению давления вниз по течению от щели. Последующая затем противоположная фаза (струйное движение к стенке) способствует обрушению потока с формированием области рециркуляции с указанным выше направлением вращения.

Тщательная настройка оптической системы с акцентом на пристенную область течения УОТ позволяет визуализировать тонкий промежуточный слой между поверхностью модели и основным потоком, который выглядит в виде темной полосы. Пример визуализации такого слоя, толщина которого, например, посередине перфорированного участка, составляет доли миллиметра, приведен на рис. 4. Отметим, кстати, что типичные значения толщины подслоя технически сложно измерить традиционными методами зондирования потока.

Сравнение полученных результатов с данными численного расчета дает основание полагать, что указанный слой можно идентифицировать как вязкий подслой турбулентного ПС, оказывающий решающее влияние на развитие течения и особенно на величину сопротивления. Действительно, на рис. 5 представлена зависимость $\delta_L = f(Q)$, отражающая характер изменения толщины вязкого подслоя δ_L при увеличении расхода Q через перфорированную поверхность. Здесь приведены данные разных серий экспериментов, проведенных с интервалом около года.

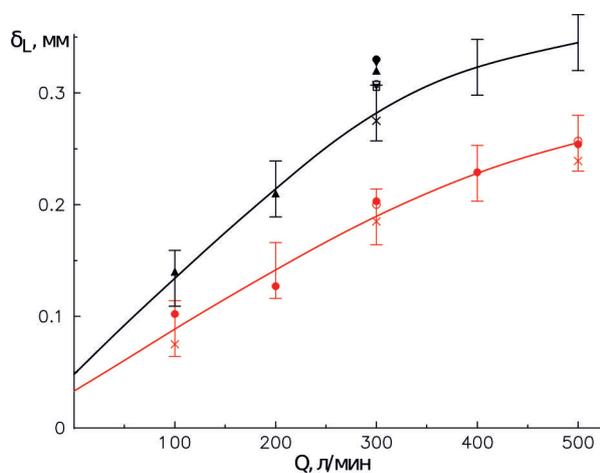


Рис. 5. Зависимость толщины вязкого подслоя от объемного расхода воздуха через перфорированную поверхность. Темные символы – $U_\infty = 6,5$ м/с (эксперименты разных серий), красные символы – $U_\infty = 15$ м/с; крестик – численный расчет; кривые – аппроксимация экспериментальных данных
 Fig. 5. Dependence of the thickness of viscous sublayer on the volumetric air flow rate through perforated surface. Black: $U_\infty = 6.5$ m/s (experiments of different series), red: $U_\infty = 15$ m/s; cross: numerical calculation; curves: approximation of experimental data

Как видно, величина δ_L непрерывно возрастает при увеличении расхода воздуха, что не противоречит динамике изменения этой величины, полученной прямыми измерениями на плоской пластине [5]. Кроме того, поскольку данные измерений разных серий экспериментов укладываются в доверительный интервал $\pm 0,025$ мм, определяемый разрешением цифровой камеры (вертикальные линии), можно с уверенностью утверждать, что δ_L уменьшается с увеличением скорости потока U_∞ , что согласуется с характером изменения этой величины в классическом случае. Отметим также тот важный факт, что результаты эксперимента находятся в качественном согласии с данными численного расчета. Правда, имеет место отклонение расчетной локальной скорости в подслое от линейного характера зависимости $U = f(y)$, которое составляет порядка 2–3 % от скорости потока. Поэтому толщина вязкого подслоя δ_L в этом случае определялась из условия $U/U_{\text{лин}} = 0,98$, где $U_{\text{лин}}$ – скорость потока, полученная на основе линейной аппроксимации расчетного профиля скорости.

Заключение

Метод лазерного ножа с засевом потока светорассеивающими частицами размером 1–2 мкм, сформированными из смеси на основе воды, позволяет визуализировать тонкую пристенную область течения, идентифицируемую как вязкий подслей, формирующийся при осесимметричном обтекании тела вращения несжимаемым потоком. Полученные данные показывают, что толщина подслоя возрастает при увеличении расхода вдуваемого воздуха через перфорированный участок поверхности, что не противоречит динамике изменения этой величины при моделировании эффекта вдува на плоской стенке. Результаты эксперимента находятся в качественном согласии с данными численного расчета. Засев потока указанными светорассеивающими частицами не загрязняет поток, что очень важно для аэродинамических труб, основным измерительным инструментом в которых является термоанемометр.

Список литературы

1. **Hwang D.** Review of research into the concept of the microblowing technique for turbulent skin friction reduction // *Progress in Aerospace Sci.* 2004. Vol. 40. P. 559–575.
2. **Li J., Lee C.-H., Jia L., Li X.** Numerical study on the flow control by micro-blowing // *Proc. of the 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Orlando, Fl. (USA) 2009.* AIAA No. 2009-779.
3. **Kornilov V. I., Boiko A. V.** Flat-plate drag reduction with streamwise noncontinuous microblowing // *AIAA J.* 2014. Vol. 52. P. 93–103.
4. **Базовкин А. В., Ковеня В. М., Корнилов В. И., Лебедев А. С., Попков А. Н.** Влияние микровдува газа с поверхности пластины на ее сопротивление // *ПМТФ.* 2012. Т. 53, № 4. С. 26–37.
5. **Kornilov V. I.** Current state and prospects of researches on the control of turbulent boundary layer by air blowing // *Progress in Aerospace Sci.* 2015. Vol. 76. P. 1–23.
6. **Шквар Е. А., Джамеа А., Е. Ш.-Ю., Цай Ц.-Ч, Крыжановский А. С.** Улучшение аэродинамики высокоскоростных поездов посредством микровдува // *Теплофизика и аэромеханика.* 2018. Т. 25, № 5. С. 701–714.
7. **Atzori M., Vinuesa R., Schlatter P., Gatti D., Stroh A., Frohnepfel B.** Effects of uniform blowing and suction on turbulent wing boundary layers // *Proc. of the Eur. Drag Reduction and Flow Control Meeting (EDRFCM), March 26–29, 2019, Bad Herrenalb, Germany.* 2019. P. 93–126.
8. **Eto K., Kondo Y., Fukagata K., Tokugawa N.** Assessment of friction drag reduction on a Clark-Y airfoil by uniform blowing // *AIAA J.* 2019. Vol. 57. P. 2774–2782.
9. **Хабощан Х. Н., Юсефи Э., Своркан Е.** Анализ турбулентного пограничного слоя и возможности уменьшения поверхностного сопротивления на плоской пластине с использованием микровдува // *ПМТФ.* 2022. Т. 63, № 3. С. 62–74.

10. **Корнилов В. И., Меньшикова И. В., Пивоваров А. А.** Численное моделирование процесса взаимодействия массива микроструй с турбулентным сдвиговым потоком // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30, № 4. С. 651–667.
11. **Корнилов В. И., Попков А. Н.** Состояние и перспективы исследований по управлению турбулентным пограничным слоем с помощью вдува воздуха на теле вращения (обзор) // Прикладная механика и техническая физика. 2023. OnlineFirst на eLIBRARY ID: 54386974 <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54386974>. DOI: 10.15372/PMTF202315344
12. **Merzkirch W.** Flow Visualization: Orlando e.a.: Acad. Press Inc., Second Edition, 1987. 260 p.
13. **Liu S., Li H., Braun M. J.** Experimental study on skin friction reduction with micro-blowing // Proc. of HT-FED04 2004 ASME Heat Transfer/Fluids Engineering Summer Conference, July 11–15, 2004, Charlotte, North Carolina, USA. P. 1–5.
14. **Бильский А. В., Гобызов О. А., Корнилов В. И., Маркович Д. М.** Исследование влияния вдува воздуха в турбулентный пограничный слой методом цифровой трассерной визуализации // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2013. Т. 8, вып. 2. С. 79–85.
15. **Menter F. R.** Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA J. 1994. Vol. 32, no. 8. P. 1598–1605.

References

1. **Hwang D.** Review of research into the concept of the microblowing technique for turbulent skin friction reduction. *Progress in Aerospace Sci*, 2004, vol. 40, pp. 559–575.
2. **Li J., Lee C.-H., Jia L., Li X.** Numerical study on the flow control by micro-blowing. *Proc. of the 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Orlando, Fl. (USA) 2009*. AIAA No. 2009-779.
3. **Kornilov V. I., Boiko A. V.** Flat-plate drag reduction with streamwise noncontinuous microblowing. *AIAA J*, 2014, vol. 52, pp. 93–103.
4. **Bazovkin A. V., Kovenya V. M., Kornilov V. I., Lebedev A. S., Popkov A. N.** Effect of microblowing of a gas from the surface of a flat plate on its drag. *J. Appl. Mech. Tech. Phys*, 2012, vol. 53, no. 4, pp. 490–499. (in Russ.)
5. **Kornilov V. I.** Current state and prospects of researches on the control of turbulent boundary layer by air blowing. *Progress in Aerospace Sci*, 2015, vol. 76, pp. 1–23.
6. **Shkvar E. O., Jamea A., E S.-J., Cai J.-C., Kryzhanovskiy A. S.** Effectiveness of blowing for improving the high-speed trains aerodynamics. *Thermophys Aeromechanics*, 2018, vol. 25, no. 5. pp. 675–686. (in Russ.)
7. **Atzori M., Vinuesa R., Schlatter P., Gatti D., Stroh A., Frohnappfel B.** Effects of uniform blowing and suction on turbulent wing boundary layers. *Proc. of the Eur. Drag Reduction and Flow Control Meeting (EDRFCM), March 26–29, 2019, Bad Herrenalb, Germany, 2019*, pp. 93–126.
8. **Eto K., Kondo Y., Fukagata K., Tokugawa N.** Assessment of friction drag reduction on a Clark-Y airfoil by uniform blowing. *AIAA J*, 2019, vol. 57, pp. 2774–2782.
9. **Khaboshan H. N., Yousefi E., Svorcan J.** Analysis of the Turbulent Boundary Layer and Skin-Friction Drag Reduction of a Flat Plate by using the Micro-Blowing Technique. *J. Appl. Mech. Tech. Phys*, 2022, vol. 63, no. 3, pp. 62–74. (in Russ.)
10. **Kornilov V. I., Menshchikova I. V., Pivovarov A. A.** Numerical simulation of interaction of a microjet array with a turbulent shear flow. *Thermophys Aeromechanics*, 2023, vol. 30, no. 4, pp. 615–631. (in Russ.)
11. **Kornilov V. I., Popkov A. N.** Current state and prospects of researches on the control of turbulent boundary layer by air blowing on a body of revolution (review). *J. Appl. Mech. Tech. Phys*, 2023. OnlineFirst на eLIBRARY ID: 54386974 <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54386974>. DOI: 10.15372/PMTF202315344 (in Russ.)
12. **Merzkirch W.** Flow Visualization. Orlando e.a.: Acad. Press Inc., Second Edition, 1987. 260 p.

13. **Liu S., Li H., Braun M. J.** Experimental study on skin friction reduction with micro-blowing. *Proc. of HT-FED04 2004 ASME Heat Transfer/Fluids Engineering Summer Conference, July 11–15, 2004, Charlotte, North Carolina, USA, 2004*, pp. 1–5.
14. **Bilsky A. V., Gobyzov O. A., Kornilov V. I., Markovich D. M.** Effect of air blowing into turbulent boundary layer with particle tracking velocimetry method. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2013, vol. 8, no. 2, pp. 79–85. (in Russ.)
15. **Menter F. R.** Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA J*, 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605.

Сведения об авторах

Корнилов Владимир Иванович, доктор физико-математических наук

Пивоваров Андрей Александрович, младший научный сотрудник

Попков Анатолий Николаевич, кандидат физико-математических наук

Information about the Authors

Vladimir I. Kornilov, Doctor of Science (Physics and Mathematics)

Andrey A. Pivovarov, Junior Scientist

Anatoly N. Popkov, PhD (Physics and Mathematics)

*Статья поступила в редакцию 27.12.2023;
одобрена после рецензирования 09.01.2024; принята к публикации 15.01.2024*

*The article was submitted 27.12.2023;
approved after reviewing 09.01.2024; accepted for publication 15.01.2024*

Научная статья

УДК 621.362

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-89-96

**Термоэлектрические свойства халькогенидных
полупроводниковых соединений
и эффективность процесса преобразования**

**Джамиля Гусейновна Мустафаева¹
Тамерлан Таймуразович Магкоев²**

¹Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(Государственный технологический университет)
Владикавказ, Россия

²Северо-Осетинский государственный университет им. К. Л. Хетагурова
Владикавказ, Россия

¹dzhamilya79@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1694-1230>
²<https://orcid.org/0000-0001-7830-4715>

Аннотация

Достижение максимума термоэлектрической добротности обуславливает повышение эффективности процессов преобразования за счет совершенствования термоэлектрических свойств материала. В связи с этим актуальным является исследование термоэлектрической эффективности халькогенидных полупроводниковых соединений и эффективности процесса преобразования пленочных преобразователей на их основе. Положение максимального значения термоэлектрической эффективности предопределяется параметрами рассеяния и соотношением подвижностей и эффективных масс носителей заряда. Повышение термоэлектрической эффективности материала достигается оптимизацией термоэлектрических параметров путем совершенствования свойств, что обуславливает оптимизацию концентрации носителей заряда. Совершенствование термоэлектрических свойств материала и повышение эффективности процессов преобразования обеспечивается при соответствии концентрации оптимальному значению. Применение пленочных преобразователей позволяет получать информацию в процессе контроля и измерения физических величин, а также при изготовлении наукоемкой продукции.

Ключевые слова

свойство, материал, концентрация, структура, пленка, процесс, подложка, преобразование, эффективность

Для цитирования

Мустафаева Д. Г., Магкоев Т. Т. Термоэлектрические свойства халькогенидных полупроводниковых соединений и эффективность процесса преобразования // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 1. С. 89–96. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-89-96

Thermoelectric Properties of Chalcogenide Semiconductor Compounds and Conversion Process Efficiency

Dzhamilya G. Mustafaeva¹
Tamerlan T. Magkoev²

¹North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University),
Vladikavkaz, Russian Federation

²North Ossetian State University named after K. L. Khetagurova,
Vladikavkaz, Russian Federation

¹dzhamilya79@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1694-1230>

²<https://orcid.org/0000-0001-7830-4715>

Abstract

Achieving a maximum thermoelectric figure of merit causes an increase in the efficiency of conversion processes by improving the thermoelectric properties of the material. In this regard, it is relevant to study the thermoelectric efficiency of chalcogenide semiconductor compounds and the efficiency of the conversion process of film converters based on them. The position of the maximum value of thermoelectric efficiency is predetermined by the scattering parameters and the ratio of the mobilities and effective masses of charge carriers. Increasing the thermoelectric efficiency of the material is achieved by optimizing the thermoelectric parameters by improving the properties, which leads to optimization of the concentration of charge carriers. Improving the thermoelectric properties of the material and increasing the efficiency of conversion processes is ensured when the concentration corresponds to the optimal value. The use of film transducers provides information in the process of monitoring and measuring physical quantities, as well as in the manufacture of high-tech products.

Keywords

property, material, concentration, structure, film, process, substrate, conversion, efficiency

For citation

Mustafaeva D. G., Magkoev T. T. Thermoelectric properties of chalcogenide semiconductor compounds and conversion process efficiency. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 1, pp. 89–96 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-89-96

Введение

Основной способ увеличения эффективности термоэлектрических устройств состоит в разработке новых или совершенствовании термоэлектрических свойств существующих термоэлектрических материалов. Актуальной задачей современного физического материаловедения выступают поиск новых материалов, разработка методов осаждения пленок соединений на основе халькогенидов металлов, позволяющих получить тонкопленочные материалы с воспроизводимыми свойствами, так как относительно небольшие вариации состава могут приводить к существенному изменению их свойств. К таким материалам относятся халькогениды меди и серебра ($A^I_2B^{VI}$, $A^I - Cu, Ag$; $B^{VI} - S, Se, Te$).

Пленки неорганических материалов получили широкое применение при создании высокоэффективных микро- и нанoeлектронных устройств различного назначения. В последние годы ведутся значительные исследования в области термоэлектрических материалов и устройств на их основе [1–5].

Среди различного рода и видов преобразователей весомую часть составляют преобразователи тепловые, которые представляют собой в основном первичные устройства в системах контроля или измерения [6–14]. Они характеризуются тем, что в их функционировании существенную роль играют тепловые процессы, так как применяются для измерения параметров тепловых процессов либо используются при преобразовании измеряемой величины в выходной сигнал [15–24].

Значительный интерес к исследованию и созданию тепловых пленочных преобразователей обусловлен ростом потребности в получении информации в области обработки, хранения,

передачи и представления информации, особенно в процессе контроля и измерения физических величин, а также при изготовлении наукоемкой продукции. Преобразователи подвергаются воздействию контролируемой физической величины и формируют эквивалентный выходной сигнал, являющийся функцией измеряемой величины.

Материалы и методы

Получение тонких пленок многокомпонентных материалов, в частности халькогенидов меди и серебра, затруднено из-за проблем, связанных с неконгруэнтным испарением компонентов исходного материала. Тонкопленочные материалы вызывают значительный интерес как с точки зрения планарной технологии, так и изготовления приборных структур и приборов функциональной электроники.

Осаждение тонких пленок полупроводниковых соединений $A^I_2B^{VI}$ (A^I – Cu, Ag; B^{VI} – S, Se, Te) обусловлено сложностью получения исходного состава на подложке.

В результате на подложке образуется пленка, имеющая весьма сложно изменяющийся состав по толщине. Кроме того, условия осаждения халькогенидов меди и серебра сильно влияют на состав и структуру пленки, а состав материала пленки влияет на их электрофизические свойства.

При термическом испарении соединений $A^I_2B^{VI}$ в вакууме имеет место изменение процентного соотношения составляющих, сравнительно невысокая адгезия пленки к материалу подложки и недостаточная стабильность пленок.

Для обеспечения воспроизводимости электрофизических свойств тонких пленок халькогенидов меди и серебра необходимо, чтобы методы осаждения позволяли получать пленки с точно контролируемым составом. Это требование становится весьма существенным при получении пленок халькогенидов металлов в силу таких их особенностей, как наличие множества различных модификаций при незначительно отличающихся составах пленок этих соединений [25].

Тонкие пленки халькогенидов металлов толщиной 0,5–1,2 мкм получали методами испарения и вакуумного напыления. В частности, пленки халькогенидов меди и серебра получены методом мгновенного испарения из предварительного синтезированного соединения. Для синтеза соединений в качестве исходных материалов использовали вещества марки ОСЧ. Навески брались с точностью $2 \cdot 10^{-4}$ г. После синтеза гомогенизация осуществлялась при температуре 600–800 °С в течение 8 ч.

Навеску халькогенида меди или серебра помещали в молибденовую лодочку и нагревали на 20–30 °С выше ее температуры плавления. Испарение проводилось в вакууме $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па на ситалловые подложки. Предварительно подложки нагревались до 150–200 °С.

Пленки халькогенидов металлов получены также методом импульсного напыления вещества в вакуумной установке с вакуумом $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па. Для испарения используется навеска в виде порошка. Порошок вещества помещается в σ -образный испаритель, который разогревается импульсом тока. σ -образное сечение испарителя обеспечивает высокую теплопередачу испаряемой навески.

При этом повышается эффективная вакуумная чистота в процессе осаждения, что способствует улучшению структурных и электрофизических свойств осаждаемых тонких пленок.

Термоэлектрические свойства материала и эффективность процесса преобразования

Достижение максимума термоэлектрической добротности $Z = \alpha^2\sigma/\chi$ обуславливает повышение эффективности процессов преобразования за счет улучшения термоэлектрических

свойств материала, т. е. электропроводности σ , коэффициентов термо-ЭДС α и теплопроводности χ .

В полупроводниковых материалах коэффициент теплопроводности содержит фоновую составляющую, обусловленную переносом тепла за счет тепловых колебаний атомов кристаллической решетки, и электронную (дырочную), обусловленную переносом тепла свободными носителями.

Для заданной температуры величина добротности достигает максимума при некоторой оптимальной концентрации:

$$Z = f(\mu^*, \beta_Z, r),$$

где

$$\beta_Z = \frac{2(2\pi)^{3/2}}{h^3 e} k_0^{7/2} \frac{\mu_0}{\chi_0} \left(\frac{m^*}{m_0} \right)^{3/2} T^{5/2},$$

h – постоянная Планка; k_0 – постоянная Больцмана; e – заряд электрона; χ_0 – фоновая составляющая теплопроводности; μ^* – химический потенциал; μ_0 – подвижность носителей заряда; r – параметр, зависящий от механизма рассеяния; m^* – эффективная масса; m_0 – масса покоя.

Вместо термоэлектрической добротности Z используется безразмерный параметр (или эффективность): $Z \cdot T = \alpha^2 \sigma T / \chi$, где T – температура, К.

Положение максимального значения термоэлектрической эффективности предопределяется параметрами рассеяния и соотношением подвижностей μ_0 и эффективных масс носителей заряда m^* . Повышение термоэлектрической эффективности обеспечивается применением соединений и сплавов и совершенствованием их свойств.

Зависимости термоэлектрической добротности для халькогенидов меди от изменения концентрации в подрешетке металла приведены на рис. 1, которые построены по результатам измерения термоэлектрических свойств – электропроводности σ , термо-ЭДС α , теплопроводности χ . Из зависимостей следует, что термоэлектрическая добротность для халькогенидов меди имеет максимум при определенных значениях концентрации носителей заряда – для сульфида меди при концентрации $(1-3) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, селенида меди – $(6-8) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, теллурида меди – $9 \cdot 10^{18} - 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Достижение максимума термоэлектрической добротности обеспечивается при соответствии концентрации оптимальному значению. При этом значения добротности увеличиваются в 1,4 раза по сравнению со значением добротности при стехиометрическом составе.

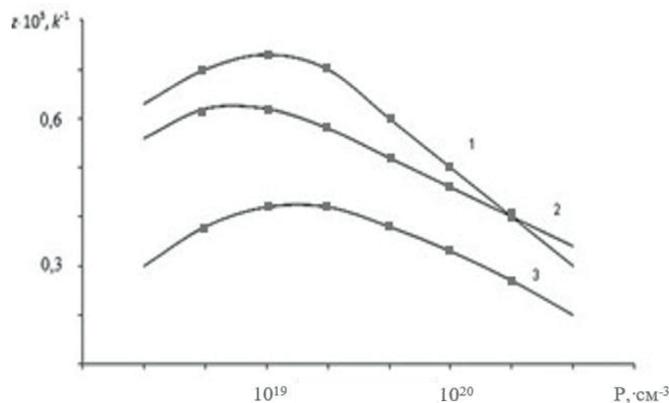


Рис. 1. Зависимости термоэлектрической добротности от концентрации:

1 – теллурид меди; 2 – селенид меди; 3 – сульфид меди

Fig. 1. Dependence of thermoelectric figure of merit on concentration:

1 – copper telluride; 2 – copper selenide; 3 – copper sulfide

Переход от объемной структуры к пленочной вызывает определенные трудности, связанные с разработкой пленочных преобразователей, которые обусловлены значительным уменьшением их размеров, так как размеры чувствительного элемента становятся соизмеримыми с размерами других элементов преобразователя, в частности, с размерами элементов – крепления, выводов, питания, при этом возрастает влияние данных элементов на характеристики преобразователя через различные взаимодействия между ними. Из-за малых размеров преобразователя усиливается действие на его характеристики различных паразитных воздействий.

Вследствие этого при их проектировании необходимо учитывать значительное количество параметров, которые существенно влияют на характеристики пленочного преобразователя. Это требование значительно усложняет процесс проектирования пленочных преобразователей. Пленочные преобразователи характеризуются тем, что в их функционировании большую роль играют тепловые процессы, так как они используются при преобразовании измеряемой величины в выходной сигнал.

Достижение высоких эксплуатационных характеристик при изготовлении пленочных преобразователей обеспечивается решением конструктивно-технологических подходов при их проектировании с учетом протекающих в них процессах. Физические процессы, протекающие в пленочных преобразователях, приводят к формированию сигнала, который зависит от уровня входной величины. Элементы конструкции пленочного преобразователя находятся в определенных связях и представляют собой структуру с комбинацией различных пленочных слоев.

Пленочные преобразователи имеют малые размеры, характеризуются малой инерционностью, малым энергопотреблением. Пленочные преобразователи изготавливаются по микроэлектронной технологии, в которой используются групповые методы при формировании структуры, что повышает воспроизводимость параметров, характеризуются высокой надежностью, совмещаются с устройствами последующей обработки измерительных сигналов и устройствами управления, изготовленными по микроэлектронной технологии. Конструкция и технология изготовления пленочных преобразователей взаимосвязаны и весьма коррелированы. Пленочный преобразователь включает конструктивные элементы: основание, изолированный, теплогенерирующий, термочувствительный, проводники, контактные площадки.

При создании пленочных преобразователей можно выделить следующие стадии: при проектировании – определение структуры, которая в наибольшей степени соответствует предъявляемым требованиям, определение конструктивных параметров; при исследовании – определение характеристик, исходя из значений его конструктивных параметров, изучение влияния различных факторов на характеристики; при изготовлении – определение режимов технологических операций изготовления, исходя из его конструктивных параметров; при эксплуатации – определение влияния условий эксплуатации на характеристики, оптимальных режимов функционирования. Результатом соответствия преобразователей является информация о конструктивных параметрах и эксплуатационных характеристиках, режимы технологических операций. Необходимо отметить, что при проектировании, исследовании и эксплуатации пленочных преобразователей параметры относятся собственно к преобразователю, тогда как при его изготовлении – к технологическим процессам.

При анализе пленочных преобразователей применяются различные подходы, которые различаются уровнем и используемым аппаратом: системный, распределенных систем, термодинамический, микроскопический. При исследовании и проектировании пленочных преобразователей используется подход системный и распределенных систем. При анализе процессов, протекающих в преобразователе, используется подход микроскопический и термодинамический.

Структура пленочного преобразователя зависит от физических принципов, используемых при функционировании элементов, применяемых конструкций, технологий изготовления и материалов. Тепловые процессы в пленочных преобразователях протекают в термически изолированной структуре и элементах, связанных с этой структурой, свойства которой и рас-

положенных на ней элементов определяют основные тепловые характеристики пленочных преобразователей.

Основание является несущим элементом, на котором располагаются контактные площадки, служащие для присоединения выводов. Выбор материала и конструкции основания пленочного преобразователя определяются ее конструктивно-технологическими особенностями. Изолированная структура играет роль подложки и служит для размещения других элементов пленочного преобразователя. В качестве теплогенерирующих элементов применяются слои поглощающие, обеспечивающие преобразование энергии излучения в тепловую энергию.

Термочувствительные элементы выполняют функцию преобразования значения температуры в электрический сигнал. В качестве чувствительных элементов в пленочных преобразователях используются термоэлектрические преобразователи на основе халькогенидных полупроводниковых соединений (рис. 2). В пленочных преобразователях уровень входного сигнала преобразуется в тепловой, для этого используется теплогенерирующий элемент, а затем в выходной электрический сигнал. При отсутствии измеряемой величины выделение тепла в пленочных преобразователях также прекращается. В пленочных преобразователях на основе халькогенидных полупроводниковых соединений в качестве термочувствительных элементов употребляются термопары пленочные, при их изготовлении используются адгезионные подслои. В качестве адгезионного подслоя применяются тонкие слои хрома, нихрома. Преимущество термоэлектрических элементов состоит в возможности варьировать их чувствительность путем изменения числа термопар.

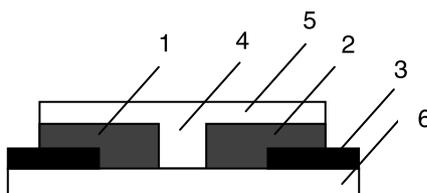


Рис. 2. Пленочная термопара:

1 – слой халькогенида меди; 2 – слой халькогенида серебра; 3 – контакты;
4 – резистивный слой; 5 – диэлектрическое покрытие; 6 – подложка

Fig. 1. Film thermocouple:

1 – layer of copper chalcogenide; 2 – silver chalcogenide layer; 3 – contacts;
4 – resistive layer; 5 – dielectric coating; 6 – substrate

Контактные выводы располагают на основании пленочного преобразователя. Элементы пленочного преобразователя изготавливаются в основном в тонкопленочном исполнении, которое совместимо с микроэлектронной технологией. Использование технологических приемов микроэлектроники при создании пленочных преобразователей позволяет значительно улучшить их эксплуатационные параметры.

Заключение

Проведенные исследования свидетельствуют, что зависимости термоэлектрической добротности для халькогенидов меди имеют максимум при определенных значениях концентрации носителей заряда. Достижение максимума термоэлектрической добротности обеспечивается при соответствии концентрации оптимальному значению. При этом значения добротности увеличиваются в 1,4 раза по сравнению со значением добротности при стехиометрическом составе. Достижение максимума термоэлектрической добротности обуславливает повышение эффективности процесса преобразования за счет улучшения термоэлектрических свойств материала. Технологические трудности получения пленок халькогенидных полупроводниковых

соединений с воспроизводимыми свойствами обусловлены различием парциальной упругости паров составляющих компонентов. Метод мгновенного испарения из предварительно синтезированных халькогенидных полупроводниковых соединений обеспечивает воспроизводимость и сохранение состава исходного материала на пленке.

Список литературы / References

1. **Richner P., Gaspar P.G., Goncalves L.C., Almeida D.** Experimental results analysis of the energy conversion efficiency of thermoelectric generators // *The Renewable Energy & Power Quality J.* 2011. Vol. 1. № 9. P. 278–282.
2. **Twaha S., Zhu J., Yan Y., Li B.** A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modelling and performance improvement // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2016. Vol. 65. P. 698–726.
3. **Champier D.** Thermoelectric generators: A review of applications // *Energy Convers. Manage.* 2017. Vol. 140. P. 167–181.
4. **Solbrekken G. L., Yazawa K., Bar-Cohen A.** Thermal management of portable electronic equipment using thermoelectric energy conversion // *Conference proceeding, 9th Intersociety Conference on Thermal and thermomechanical Phenomena in Electronic Systems.* 2004. Vol. 1. P. 276–283.
5. **Liu W., Hu J., Zhang S., Deng M., Han C.-G., Liu Y.** New trends, strategies and opportunities in thermoelectric materials: A perspective // *Materials Today Physics.* 2017. Vol. 1. P. 50–60.
6. **Senturia S. D.** Simulation and design of microsystems: A 10-year perspective // *Sensors and Actuators A. Physical.* 1998. Vol. 67. P. 1–7.
7. **Baltes H., Paul O., Brand O.** Micromachined Thermally Based CMOS Microsensors // *Proceedings of the IEEE.* 1998. Vol. 86. P. 1660–1678.
8. **Van Herwaarden A. W., van Duyn D. C., van Oudheusden B. W., Sarro P. M.** Integrated thermopile sensors // *Sensors and Actuators A. Physical.* 1989. Vol. 21–23. P. 621–630.
9. **Middelhoek S., Hoogerwerf A. C.** Classifying solid-state sensors: The S'ensor effect cube' // *Sensors and Actuators.* 1986. Vol. 10. P. 1–8.
10. **Zerrik E., Badraoui L., El Jai A.** Sensors and regional boundary state reconstruction of parabolic systems // *Sensors and Actuators A. Physical.* 1999. Vol. 75. P. 102–117.
11. **Al-Saphory R., El Jai A.** Sensors characterizations for regional boundary detectability in distributed parameter systems // *Sensors and Actuators A. Physical.* 2001. Vol. 94. P. 1–10.
12. **Zerrik E., Bourray H.** Flux reconstruction: Sensors and simulations // *Sensors and Actuators A. Physical.* 2003. Vol. 109. P. 34–46.
13. **Ylilammi M.** Thermodynamics of sensors // *Sensors and Actuators.* 1989. Vol. 18. P. 167–178.
14. **Klaassen E. H., Reay R. J., Storment C., Kovacs G. T. A.** Micromachined thermally isolated circuits // *Sensors and Actuators A. Physical.* 1997. Vol. 58. P. 43–50.
15. **Mityakov A. V., Sapozhnikov S. Z., Mityakov V. Y., Snarskii A. A., Zhenirovsky M. I., Pyrhönen J. J.** Gradient heat flux sensors for high temperature environments // *Sensors and Actuators A. Physical.* 2012. Vol. 176. P. 1–9.
16. **Huang S., Tao H., Lin I.-K., Zhang X.** Development of double-cantilever infrared detectors: Fabrication, curvature control and demonstration of thermal detection // *Sensors and Actuators A. Physical.* 2008. Vol. 145–146. P. 231–240.
17. **Kersjes R., Mokwa W.** A fast liquid flow sensor with thermal isolation by oxide-filled trenches // *Sensors and Actuators A. Physical.* 1995. Vol. 46–47. P. 373–379.
18. **Neda T., Nakamura K., Takumi T.** A Polysilicon Flow Sensor for Gas Flow Meters // *Sensors and Actuators A. Physical.* 1996. Vol. 54. P. 626–631.

19. **Sun J., Cui D., Zhang L., Chen X., Cai H., Li H.** A micro gas chromatography column with a micro thermal conductivity detector for volatile organic compound analysis // *Sensors and Actuators A. Physical*. 2013. Vol. 193. P. 25–29.
20. **Lee M., Yoo M.** Detectivity of thin-film NTC thermal sensors // *Sensors and Actuators A. Physical*. 2002. Vol. 96. P. 97–104.
21. **Chung W.-Y., Lim J.-W., Lee D.-D., Miura N., Yamazoe N.** Thermal and gas-sensing properties of planar-type micro gas sensor // *Sensors and Actuators B. Chemical*. 2000. Vol. 64. P. 118–123.
22. **Hung S.-T., Wong S.-C., Fang W.** The development and application of microthermal sensors with a mesh-membrane supporting structure // *Sensors and Actuators A. Physical*. 2000. Vol. 84. P. 70–75.
23. **Fung S. K. H., Tang Z., Chan P. C. H., JSin. K. O., Cheung P. W.** Thermal analysis and design of a micro-hotplate for integrated gas-sensor applications // *Sensors and Actuators A. Physical*. 1996. Vol. 54. P. 482–487.
24. **Van Herwaarden S.** Physical principles of thermal sensors // *Sensors and Materials*. 1996. Vol. 8. P. 373–387.
25. **Mustafaev G. A., Mustafaeva D. G., Mustafaev M. G.** Thermophysical properties of chalcogenide semiconductor compounds and the effect of defects on their properties // *Siberian Journal of Physics*. 2023. Vol. 18, no. 2. P. 76–82 (in Russ). DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-2-76-82

Сведения об авторах

Мустафаева Джамиля Гусейновна, кандидат технических наук

Магкоев Тамерлан Таймуразович, доктор физико-математических наук

Information about the Authors

Dzhamilya G. Mustafaeva, Candidate of Technical Sciences

Tamerlan T. Magkoev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences

*Статья поступила в редакцию 20.11.2023;
одобрена после рецензирования 13.12.2023; принята к публикации 02.02.2024*
*The article was submitted 20.11.2023;
approved after reviewing 13.12.2023; accepted for publication 02.02.2024*

Информация для авторов

«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-xxxx>

Аннотация

Ключевые слова

Благодарности

Evaluation of Convective Mass Transfer

Ivan I. Ivanov

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-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 (Сур), 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.

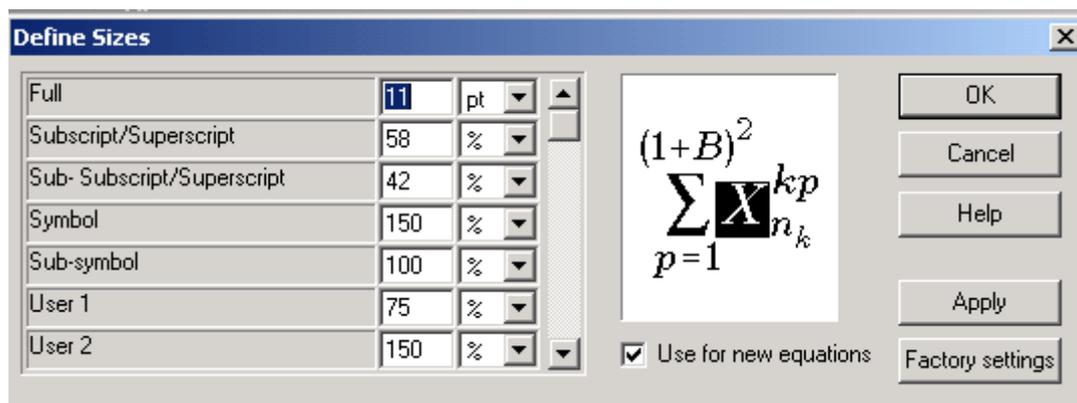
9. Число рисунков должно быть логически оправданным, качество – высоким. Файлы изображений должны находиться в том же каталоге, что и основной документ, и иметь имена, соответствующие номерам рисунков в рукописи (например, 09.tif или 22a.jpg).

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...

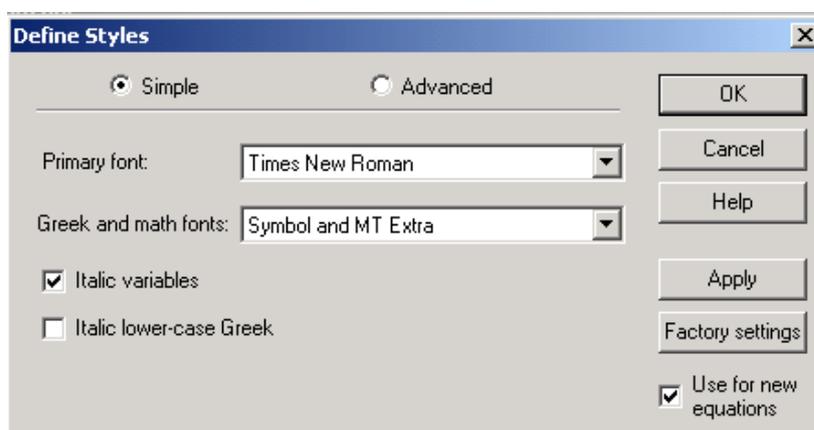
11. Формулы набираются в редакторе формул Microsoft Equation MathType в подбор к тексту или отдельной строкой по центру, **кегль 11 пт.**

Нумерация формул сквозная, в круглых скобках, прижатых к правому полю. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в тексте.

Настройки редактора формул



a



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 А4) 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