

Научная статья

УДК 539.126.3, 539.125.4, 539.125.46

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18413>

**ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЯТЬ СВОЙСТВА  
ИДЕНТИФИЦИРОВАННЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ АДРОНОВ  
В СТОЛКНОВЕНИЯХ ЯДЕР КСЕНОНА С НЕПОДВИЖНОЙ  
ВОЛЬФРАМОВОЙ МИШЕНЬЮ ПРИ ЭНЕРГИИ 2,5 А ГЭВ  
В ДЕТЕКТОРЕ MPD НА УСКОРИТЕЛЕ NICA**

**Я. А. Бердников<sup>1</sup>, Д. А. Иванищев<sup>1, 2</sup> □, Д. О. Котов<sup>1</sup>, М. В. Малаев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константина

НИЦ «Курчатовский институт», г. Гатчина, Россия

□ [ivanishchev\\_da@pnpi.nrcki.ru](mailto:ivanishchev_da@pnpi.nrcki.ru)

**Аннотация.** В работе исследованы возможности измерять свойства идентифицированных заряженных легких адронов ( $\pi^\pm$ - и  $K^\pm$ -мезонов, а также протонов) в столкновениях ядер ксенона Xe с неподвижной мишенью из вольфрама W при кинетической энергии налетающего пучка  $E_{kin} = 2,5\text{A}$  ГэВ с помощью экспериментальной установки (ЭУ) MPD на ускорителе NICA. Получены оценки чистоты восстанавливаемого спектра в ЭУ MPD, эффективности восстановления спектров в ЭУ MPD и дифференциальных спектров по поперечному импульсу для исследуемых легких адронов. Оценки вычисляны как зависимости от поперечного импульса для различных интервалов по центральности столкновений Xe + W в центральной области быстрот посредством модельных расчетов. Использовался подход на основе б-параметризации информации об идентификации частиц в ЭУ MPD.

**Ключевые слова:** столкновение ядер, рождение, адрон, ускоритель NICA, детектор MPD

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках Государственного задания на проведение фундаментальных исследований (код темы FSEG-2025-0009).

**Для цитирования:** Бердников Я. А., Иванищев Д. А., Котов Д. О., Малаев М. В. Возможности измерять свойства идентифицированных заряженных адронов в столкновениях ядер ксенона с неподвижной вольфрамовой мишенью при энергии 2,5A ГэВ в детекторе MPD на ускорителе NICA // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2025. Т. 18. № 4. С. 177–189. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18413>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18413>

## FEASIBILITY TO MEASURE THE PROPERTIES OF IDENTIFIED CHARGED HADRONS IN COLLISIONS OF XENON NUCLEI WITH A FIXED TUNGSTEN TARGET AT AN ENERGY OF 2.5A GeV IN THE MPD DETECTOR AT THE NICA COLLIDER

Ya. A. Berdnikov<sup>1</sup>, D. A. Ivanishchev<sup>1, 2</sup> □, D. O. Kotov<sup>1</sup>, M. V. Malaev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;

<sup>2</sup> Petersburg Nuclear Physics Institute named by B. P. Konstantinov

of NRC «Kurchatov Institute», St. Petersburg, Russia

□ [ivanishchev\\_da@pnpi.nrcki.ru](mailto:ivanishchev_da@pnpi.nrcki.ru)

**Abstract.** We report results on a feasibility study of measuring the properties of identified charged light hadrons ( $\pi^\pm$  and  $K^\pm$  mesons as well as protons) in collisions of Xe nuclei with a fixed tungsten target at an energy of 2.5A GeV using the MPD detector at the NICA collider. The evaluations of the purity of the reconstructed spectrum in the MPD detector, reconstruction efficiency of the spectra in the MPD detector and the transverse momentum spectra for the  $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$  mesons and protons were made. The evaluations were obtained depending on the transverse momentum for different intervals of centrality of Xe + W collisions in the central rapidity range using model calculations. We used an approach based on  $\sigma$ -parameterization of particle identification information in the MPD detector.

**Keywords:** nuclei collision, production, hadron, NICA collider, MPD detector

**Funding:** The reported study was carried out within the framework of the State Assignment for Fundamental Research (Subject Code FSEG-2025-0009).

**For citation:** Berdnikov Ya. A., Ivanishchev D. A., Kotov D. O., Malaev M. V., Feasibility to measure the properties of identified charged hadrons in collisions of xenon nuclei with a fixed tungsten target at an energy of 2.5A GeV in the MPD detector at the NICA collider, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 18 (4) (2025) 177–189. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18413>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

### Введение

Исследование процессов, происходящих при столкновениях тяжелых релятивистских ядер, и особенностей образования ядерной среды в таких столкновениях является одним из наиболее важных направлений в физике высоких энергий [1, 2]. Уже почти 40 последних лет на различных ускорительных комплексах по всему миру ставят эксперименты по изучению ядерного вещества в экстремальных условиях при больших значениях барионных плотностей и/или температур. Наиболее значимым открытием в этой области стало обнаружение сильновзаимодействующей кварк-глюонной плазмы (КГП), ведущей себя как идеальная жидкость, на Релятивистском коллайдере тяжелых ионов (англ. Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)) в Брукхейвенской национальной лаборатории (BNL, США) и на Большом адронном коллайдере (англ. Large Hadron Collider (LHC)) в Европейской организации по ядерным исследованиям (CERN, Швейцария) в столкновениях тяжелых ядер при энергии столкновения на нуклон-нуклонную пару в системе центра масс  $\sqrt{S_{NN}} = 0,1 - 5$  ТэВ [3, 4]. Более детальный анализ экспериментальных данных, накопленных ранее на Протонном суперсинхротроне (англ. Super Proton Synchrotron (SPS)) в Европейской организации по ядерным исследованиям, также подтвердил образование кварк-глюонной плазмы в столкновениях тяжелых ядер при энергии  $\sqrt{S_{NN}}$ , примерно равной 17 ГэВ [5].

© Berdnikov Ya. A., Ivanishchev D. A., Kotov D. O., Malaev M. V., 2025. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.



Полученные результаты свидетельствуют о существовании перехода из адронной материи в КГП при критической температуре, примерно равной 170 МэВ, и почти нулевой барионной плотности; такой переход был предсказан теоретически с помощью ряда моделей [3, 4]. Для построения фазовой диаграммы состояния сильновзаимодействующего ядерного вещества в областях малых температур и больших барионных плотностей ( $\sqrt{S_{NN}} = 2 - 15$  ГэВ), а также для поиска теоретически предсказанной критической точки фазового перехода, на Релятивистском коллайдере тяжелых ионов была запущена программа сканирования по энергии событий столкновения ядер [6]. На сегодняшний день не удалось экспериментально обнаружить искомую критическую точку. В ближайшее время более детальное исследование фазовой диаграммы в этой области будет проводиться на ускорительном комплексе Европейского исследовательского центра ионов и антипротонов (англ. Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR)) в Центре по изучению тяжелых ионов имени Гельмгольца (GSI, Германия) [7], на Высокоинтенсивном ускорителе тяжелых ионов (англ. High Intensity heavy ion Accelerator Facility (HIAF)) в Институте современной физики (IMP, Китай) [8] и на Сверхпроводящем коллайдере протонов и тяжелых ионов (англ. Nuclotron-based Ion Collider fAcility (NICA)), находящемся в Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна Московской области, Россия) [9] после ввода их в эксплуатацию.

Для изучения ядерной среды, образующейся в столкновениях тяжелых релятивистских ядер при малых температурах и больших барионных плотностях, на ускорителе NICA предположительно в следующем году начнется эксперимент с многофункциональным детектором (англ. Multi-Purpose Detector (MPD)) [9]. Эксперимент MPD будет работать как в режиме сталкивающихся пучков ускорителя NICA, так и в режиме с неподвижной мишенью.

Свойства среды, образующейся в столкновениях тяжелых релятивистских ядер, определяют косвенно посредством регистрации частиц, рождающихся в таких столкновениях, в экспериментальной установке и измерения их свойств различными детекторными системами. Например, особенности протекания адронной фазы измеряют путем регистрации короткоживущих адронных резонансов [1, 2, 10], а систематическое исследование рождения частиц с разным кварковым составом, барионным числом, массой, странностью и т.п. позволяет определять и описывать процессы, протекающие в плотной и горячей ядерной среде [1, 11]. Особый интерес представляют такие заряженные легкие адроны, как пионы, каоны, протоны и антипротоны [11]. Данные частицы рождаются в изобилии в столкновениях тяжелых релятивистских ядер. Эти частицы можно довольно легко идентифицировать, например, по их траектории движения в магнитном поле, энергетическим потерям в газовых детекторах, по квадрату массы или скорости, измеренной времязапрограммой и трековой системами, и/или энерговыделению в адронном калориметре.

Заряженные пионы и каоны являются мезонами, а (анти)протоны – барионами. Заряженные пионы состоят из двух самых легких кварков ( $ud$ ,  $d\bar{u}$ ), и измерение их свойств является базовым для сравнения с другими частицами. Заряженные каоны ( $u\bar{s}$ ,  $s\bar{u}$ ) обладают странностью, и их масса почти в четыре раза больше массы пионов. Протоны ( $uud$ ) состоят из трех легких кварков, и их масса почти в два раза больше массы каононов [12].

Систематическое экспериментальное исследование инвариантных спектров по поперечному импульсу  $p_T$  и поперечной массе  $m_T$  заряженных адронов, их выходов и факторов ядерной модификации преследует следующие цели:

- определить свойства горячей и плотной ядерной среды в момент ее распада на конечные адроны;

- проверить достижение системой теплового и химического равновесия;

- оценить динамику реакции, в том числе коллективные эффекты при продольном и поперечном расширении файербола.

Чтобы проследить динамику реакции, прибегают к анализу формы инвариантных спектров по поперечному импульсу  $p_T$  и среднего значения  $\langle p_T \rangle$  этого импульса.

Форма указанных спектров чувствительна к механизмам рождения частиц в различных кинематических областях, а также к взаимовлиянию радиального потока и рекомбинации партонов при промежуточных поперечных импульсах.

Анализ формы инвариантных спектров по поперечной массе позволяет установить температуру кинетической заморозки и среднюю скорость коллективного потока частиц. Изучение поведения факторов ядерной модификации обеспечивает возможность оценивать степень выраженности коллективных эффектов, по сравнению с более легкими сталкивающимися системами при той же энергии столкновения.

Для сравнения особенностей рождения частиц, например исследования эффекта избыточного выхода барионов по отношению к мезонам, используют такой параметр, как отношение их выходов. Измерение свойств каонов позволяет вникать в суть эффекта избыточного выхода странности в столкновениях тяжелых ионов [11].

Как и в других экспериментах по определению свойств плотной и горячей ядерной материи, измерение особенностей рождения идентифицированных заряженных легких адронов составляет неотъемлемую часть физической программы эксперимента MPD. До ввода в эксплуатацию экспериментальной установки MPD и начала эксперимента проводятся подготовительные работы по выстраиванию оптимальных методов измерений и оценке их применимости. Ввиду отсутствия даже первичных экспериментальных данных, такие работы базируются на выполнении модельных расчетов.

Цели настоящего исследования – разработать методику восстановления дифференциальных спектров по поперечному импульсу идентифицированных заряженных легких адронов ( $\pi^\pm$ - и  $K^\pm$ -мезонов, а также протонов  $p$ ), а затем на ее основе оценить возможность измерения свойств этих адронов в столкновениях ядер ксенона  $Xe$  с неподвижной мишенью из вольфрама  $W$  при кинетической энергии налетающего пучка  $E_{kin} = 2,5A$  ГэВ, где  $A$ , а.е.м., – атомная масса ядра.

Такие измерения предполагается проводить на экспериментальной установке MPD в области центральных быстрот, причем необходимо находить связь этих свойств с центральностью столкновений.

### **Экспериментальная установка MPD и методика модельного расчета**

**Особенности экспериментальной установки.** Функционирование этой установки оптимизировано для исследования актов столкновения тяжелых релятивистских ионов в условиях большой множественности заряженных частиц в конечном состоянии. Для столкновений тяжелых ядер на ускорителе NICA плотность множественности  $dN_{ch}/d\eta$  достигает значений 100 – 200 в области малых быстрот. Здесь  $N_{ch}$  – количество заряженных частиц в конечном состоянии,  $\eta$  – псевдобыстрота.

Согласно планам, эта установка должна обладать широким аксептансом и беспрецедентным импульсным, пространственным, временным и энергетическим разрешением, в особенности в области малых поперечных импульсов. Траектории и импульсы заряженных частиц будут измеряться во времяпроекционной камере (англ. Time Projection Chamber (TPC)), расположенной в однородном магнитном поле с индукцией 0,5 Тл, создаваемом цилиндрическим соленоидальным сверхпроводящим магнитом. В детекторе TPC будет создана возможность идентифицировать заряженные частицы путем измерения их энергетических потерь ( $dE/dx$ ) в рабочем газе детектора, состоящем из смеси аргона и метана (90 % Ar и 10 %  $CH_4$ ). Заряд частицы и импульс будут измеряться по параметрам искривления траектории заряженной частицы в магнитном поле. Вдоль траектории трека заряженной частицы детектор TPC должен будет измерять до 53 точек. Импульсное разрешение детектора TPC в области малых поперечных импульсов в столкновениях тяжелых ядер будет составлять 1,5 – 3,5 %. Детектор TPC сможет дифференцировать адроны: отличать пионы от каонов (в пределах двух среднеквадратичных отклонений) в диапазоне импульсов до 0,7 ГэВ/с, а каоны от протонов – до 1,2 ГэВ/с. Дополнительная идентификация заряженных частиц будет осуществляться времяпролетным детектором (англ. Time-Of-Flight (TOF)) по признаку времени пролета частиц. Идентификация пионов и каонов детектором TOF будет возможна только для частиц с значениями поперечного импульса  $p_T$  выше 150 и 350 МэВ/с соответственно. В текущей конфигурации магнитного поля только пионы и протоны с таким поперечным импульсом смогут достичь детектора TOF. Последний обеспечит измерение времени пролета для заряженных частиц с типичным разрешением около 80 пс. В сочетании с восстановлением трека и измерением импульса и заряда в детекторе TPC, детектор TOF позволит различать заряженные частицы путем



измерения их скорости  $\beta$  или квадрата их массы  $m^2$ . Кроме того, применение детектора TOF позволит расширить область значений поперечных импульсов, в которой возможна дифференциация адронов, а именно – отличать пионы от каонов и каоны от протонов, обладающих  $p_T$  до 1,5 ГэВ/с и 2,5 ГэВ/с соответственно.

Подробная информация о физической программе будущего эксперимента MPD, а также описание детекторных подсистем, входящих в экспериментальную установку, приведены в статье [9].

Возможности ускорительного комплекса NICA позволяют проводить эксперименты по сбору данных от столкновений тяжелых ионов как в варианте со встречными пучками частиц, так и в варианте с одним пучком частиц и неподвижной мишенью.

В данной работе рассматривается вариант работы ускорителя с неподвижной мишенью, поскольку предполагается, что такой вариант будет реализован после ввода детектора MPD в эксплуатацию. В качестве налетающего пучка частиц планируется использовать ядра ксенона Xe, а закрепленной мишенью будет служить вольфрам (мишень будет изготовлена из вольфрамовых проволок). Кинетическая энергия налетающего пучка составит  $E_{kin} = 2,5A$  ГэВ, что соответствует энергии столкновения в системе центра масс  $\sqrt{S_{NN}} = 2,87$  ГэВ. Мишень будет зафиксирована перпендикулярно оси Z на расстоянии 85 см от геометрического центра экспериментальной установки MPD в сторону налетающего пучка (ось Z коллинеарна направлению движения налетающего пучка).

**Методика модельного расчета.** С учетом вышеописанных условий, моделирование столкновений ядер ксенона и вольфрама ( $Xe + W$ ) для рассматриваемой конфигурации проводилось с помощью программного пакета UrQMD [13], который наиболее популярен среди генераторов событий для диапазона энергии столкновений, реализуемых на ускорителе NICA. Важно отметить, что эксперимент с конфигурацией столкновений ядер  $Xe + W$  влечет за собой смещение области центральных быстрот  $u$  в системе центра масс (CMS) относительно той же области в лабораторной системе координат ( $\Delta u = 0,986$ ). При моделировании это требовало специального учета. Необходимо добавить, что в настоящей работе использовалась выборка столкновений ядер  $Xe + W$  размером 15 млн. событий.

Полномасштабное моделирование откликов детекторных подсистем на взаимодействие частиц, рожденных в смоделированных столкновениях ядер  $Xe + W$ , с веществом экспериментальной установки MPD, а также восстановление треков заряженных частиц проводилось в рамках программного пакета MpdRoot [9], основанного на программных пакетах ROOT и Geant4. Программный пакет MpdRoot написан на языке программирования C++ и служит основным инструментом эксперимента MPD как для моделирования работы детекторных подсистем, так и для анализа данных, которые будут получены экспериментально.

В соответствии с целью работы, представленной выше во Введении, восстановление спектров в области центральных быстрот особо важно выполнить в максимально широком диапазоне значений поперечного импульса. При этом было выбрано семь интервалов по центральности.

Поскольку спектры рождения при таких относительно небольших энергиях столкновения ( $\sqrt{S_{NN}} = 2,87$  ГэВ) получаются очень мягкими (основная доля частиц рождается с малыми значениями поперечного импульса), восстановление сигнала в области малых значений поперечного импульса становится наиважнейшей и актуальной задачей. Помимо этого, при рассматриваемой конфигурации столкновений ядер наблюдается асимметрия в рождении положительно и отрицательно заряженных адронов. Например, в случае каонов выход отрицательно заряженных частиц значительно подавлен по отношению к выходу положительно заряженных каонов, однако для пионов асимметрии не наблюдается. Выход антипротонов при данной энергии столкновения практически равен нулю. С учетом описанной ситуации эти расчеты выполнялись отдельно для положительно заряженных частиц и для отрицательно заряженных.

Как было отмечено выше, в рассматриваемой конфигурации столкновений происходит смещение системы центра масс относительно лабораторной системы координат. Особый интерес в нашей работе представляла область центральных быстрот в системе центра масс. Но поскольку данная область близка к границам геометрического акцептанса детектора TPC, наблюдалась значительная неоднородность в доступном фазовом пространстве

(в координатах  $p_T - y$ ) при восстановлении свойств заряженных легких адронов. В связи с этим для анализа был выбран асимметричный диапазон быстрот ( $-0,5 < y_{\text{CMS}} < 0,0$ ), а также введены дополнительные ограничения на минимальное значение поперечного импульса для восстанавливаемых частиц.

В данной работе предлагается новый подход к восстановлению инвариантных спектров по поперечному импульсу заряженных легких адронов ( $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$  и  $p$ ) на основе  $\sigma$ -параметризации информации об идентификации частиц в детекторах TPC и TOF. Данный метод не требует глубокого систематического изучения и позволяет быстро получать первые физические результаты сразу после начала сбора экспериментальных данных.

В то же время предложенный подход имеет свои недостатки и ограничения, особенно в области высоких значений поперечного импульса, и в этом случае может использоваться как дополнение к другим методикам восстановления спектров идентифицированных заряженных легких адронов.

Такой подход состоит в следующем. На начальном этапе анализа из всех восстановленных треков заряженных частиц рассматриваемого столкновения ядер отбираются треки заряженных частиц, удовлетворяющие критериям отбора по количеству точек, восстановленных в детекторе TPC, и по расстоянию минимального сближения восстановленного трека с вершиной взаимодействия в этом столкновении (это расстояние от вершины взаимодействия до наиболее близкой к ней точке восстановленного трека лимитировалось специально заданным значением).

Пороги данных критериев отбора предварительно оптимизируются с целью сведения к минимуму числа ложных восстановленных треков, а также для подавления вклада в сигнал вторичных частиц (при условии приемлемых потерь сигнальных частиц).

Для отбора адронов разного типа ( $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$  и  $p$ ) проводились четыре квазинезависимые процедуры. Для протонов и заряженных пионов (первые две процедуры) была следующая последовательность действий.

*Первая процедура* (назовем ее условно « $\pi^\pm$ ,  $p$ , TPC + TOF»). Для отбора на каждую частицу налагалось требование, чтобы вероятность ее идентификации в детекторе TPC не выходила за пределы двух среднеквадратичных отклонений  $\sigma$  от базового значения вероятности, заданного анализируемому типу адрона. Если у трека из детектора TPC в детектор TOF имелось продолжение, то для этого анализируемого типа применялся дополнительный критерий отбора  $2\sigma$  (аналогичный предыдущему), но информация извлекалась из детектора TOF.

*Вторая процедура* (назовем ее условно « $\pi^\pm$ ,  $p$ , TOF + TPC»). Для отбора на каждую частицу налагалось требование, чтобы вероятность ее идентификации одновременно в детекторах TPC и TOF не выходила за пределы двух среднеквадратичных отклонений от базового значения вероятности, заданного анализируемому типу адронов.

Для отбора другого типа адронов – заряженных каонов применялись еще две процедуры, условно названные нами « $K^\pm$ , TPC + TOF» и « $K^\pm$ , TOF + TPC».

*Третья процедура* (« $K^\pm$ , TPC + TOF»). Для отбора на каждую частицу также налагалось требование, чтобы вероятность ее идентификации в детекторе TPC не выходила за определенные пределы, но не двух, а одного среднеквадратичного отклонения от базового значения вероятности, заданного анализируемому типу адронов. Кроме того, применялся дополнительный критерий отбора  $3\sigma$ , так называемый «вето-критерий», запрещающий частице быть протоном, пионом мюоном. Отбирались заряженные частицы, вероятность идентифицировать которые как протон, пион, электрон или мюон в детекторе TPC лежит за пределами трех среднеквадратичных отклонений от базового значения вероятности, заданного запретным адронам: протону, пиону, электрону или мюону.

*Четвертая процедура* (« $K^\pm$ , TOF + TPC»). Она аналогична процедуре ( $K^\pm$ , TPC + TOF), однако вето-критерий накладывался на информацию, полученную от детектора TOF, а не от TPC.

Описанные процедуры проводились отдельно для положительно и отрицательно заряженных частиц.

На рис. 1 представлены полученные результаты по эффективности  $\varepsilon$  восстановления спектров идентифицированных заряженных адронов с помощью разработанной методики для наиболее центральных столкновений ядер ксенона с вольфрамовой мишенью:

$\text{Xe} + \text{W}$ . Функция эффективности восстановления в зависимости от поперечного импульса  $\varepsilon(p_T)$  рассчитывалась в виде отношения числа отобранных заряженных адронов определенного типа к их полному числу, сгенерированному в генераторе событий.

Анализ данных на рис. 1 позволяет заключить, что спектры заряженных каонов восстанавливаются менее эффективно, чем спектры пионов и протонов. Значительная примесь пионов, а также электронов и их античастиц приводит к меньшей величине эффективности восстановления спектров заряженных каонов, особенно в области малых значений поперечного импульса. Снижение эффективности восстановления спектров идентифицированных заряженных легких адронов в области малых значений поперечного импульса обусловлено аксептансом детектора TPC и повышенными требованиями к качеству восстанавливаемых треков.

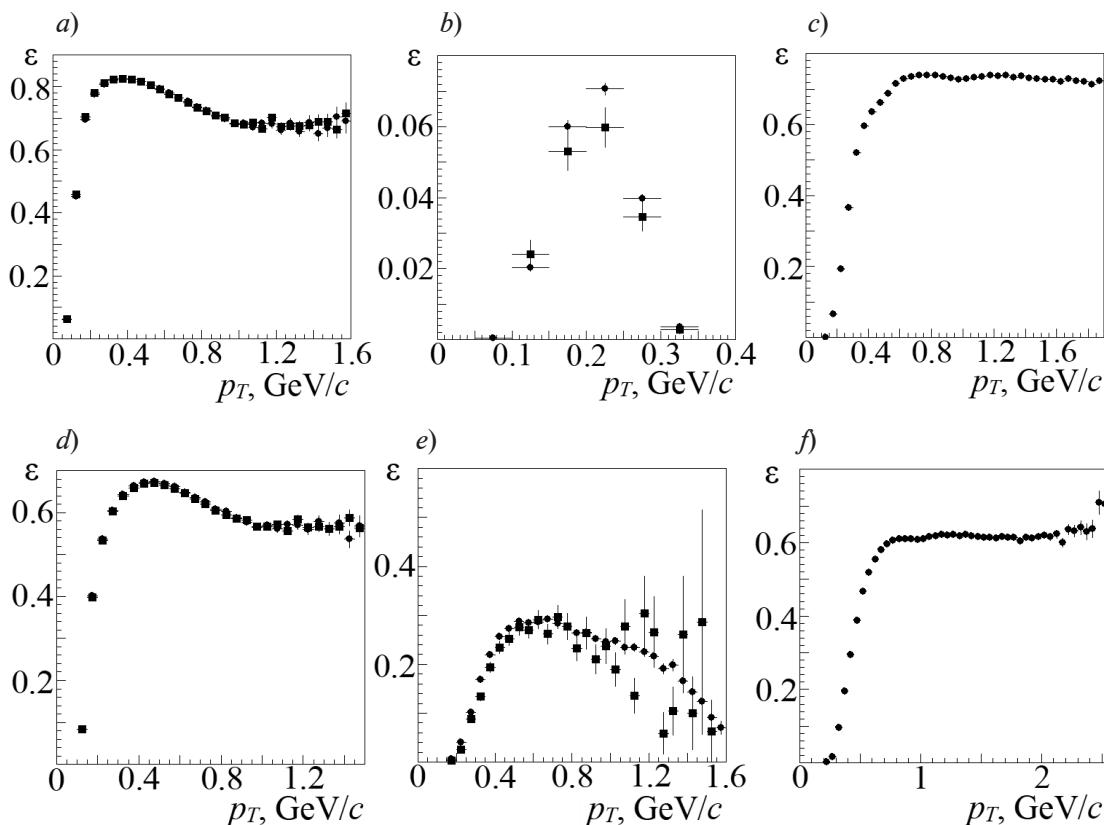


Рис. 1. Расчетные зависимости от поперечного импульса эффективности восстановления спектров  $\pi^\pm$ - (a, d) и  $K^\pm$ - (b, e) мезонов, а также протонов (c, f) с помощью MPD по процедурам ( $\pi^\pm, p$ , TPC + TOF) (a, c), ( $K^\pm$ , TPC + TOF) (b), ( $\pi^\pm, p$ , TOF + TPC) (d, f) и ( $K^\pm$ , TOF + TPC) (e).

Вычислены для столкновений ядер  $\text{Xe}$  с мишенью  $\text{W}$  при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 2,87$  ГэВ

и рожденных частиц, отрицательно (■) и положительно (●) заряженных

В результате измерений были получены промежуточные спектры пионов, каонов и протонов (зависимости выхода рожденных в столкновениях легких адронов от поперечного импульса). В ходе анализа этих спектров строились графики зависимости их чистоты  $\rho$  от величины поперечного импульса. Величина  $\rho$  есть доля правильно идентифицированных сигнальных частиц в полученном спектре (идентификация проведена на основе первичной информации Монте-Карло об анализируемых треках).

На рис. 2 представлены зависимости от поперечного импульса  $p_T$  чистоты  $\rho$  идентифицированных заряженных легких адронов, полученные через применение разработанных процедур для наиболее центральных столкновений  $\text{Xe} + \text{W}$ . Из этих данных можно заключить, что у протонов не наблюдается каких-либо существенных примесей во всем диапазоне значений поперечного импульса, доступном для анализа. Налицо та же картина при восстановлении спектров отрицательно заряженных пионов. Что же касается

положительно заряженных пионов, то их спектр остается чистым вплоть до значений поперечного импульса  $p_T$ , равных около 0,8 ГэВ/с и 1,2 ГэВ/с, когда применяли процедуры  $(\pi^\pm, p, \text{TPC} + \text{TOF})$  и  $(\pi^\pm, p, \text{TOF} + \text{TPC})$ , соответственно. При более высоких значениях поперечного импульса вклады протонов и каонов в спектр становятся весомыми. В случае восстановления спектров заряженных каонов вклады в спектр от других частиц наблюдаются в областях как малых значений поперечного импульса (электроны, пионы), так и его промежуточных и больших значений (пионы).

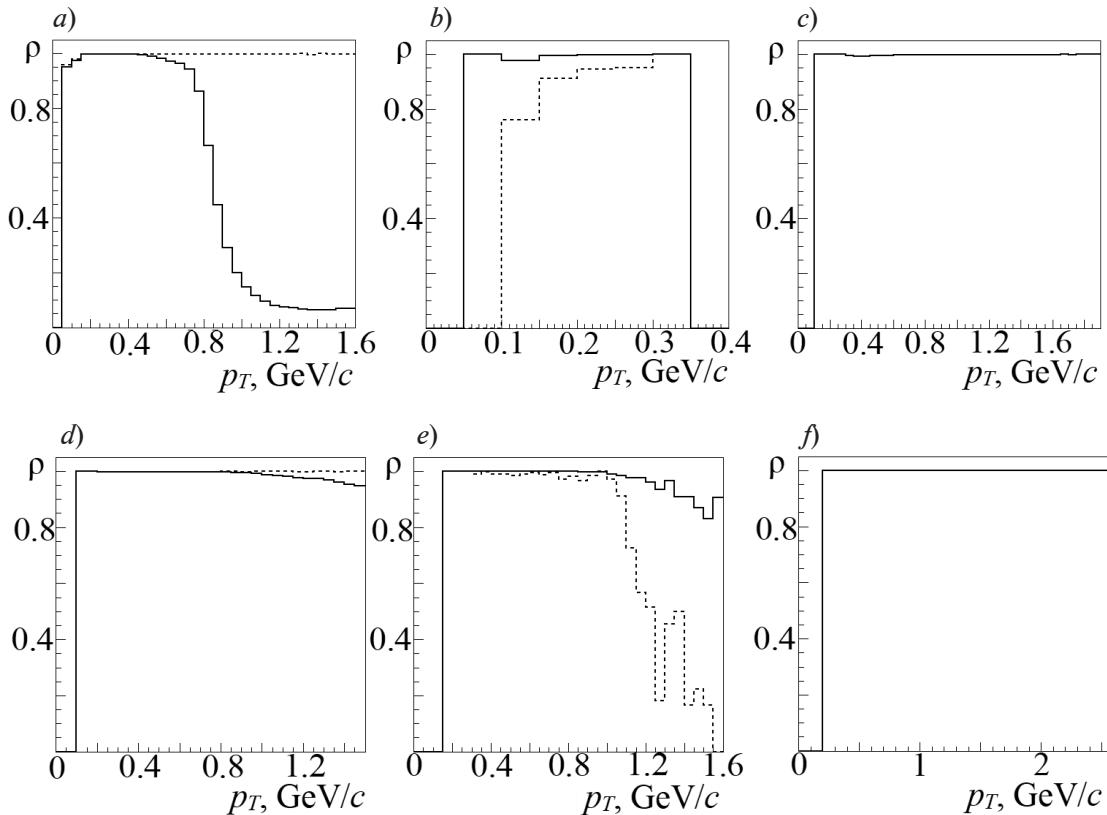


Рис. 2. Расчетные зависимости от поперечного импульса чистоты  $\rho$  восстанавливаемых спектров  $\pi^\pm$ - (a, d) и  $K^\pm$ - (b, e) мезонов, а также протонов (c, f), полученные по процедурам  $(\pi^\pm, p, \text{TPC} + \text{TOF})$  (a, c),  $(K^\pm, \text{TPC} + \text{TOF})$  (b),  $(\pi^\pm, p, \text{TOF} + \text{TPC})$  (d, f) и  $(K^\pm, \text{TOF} + \text{TPC})$  (e). Вычислены для столкновений ядер Xe с мишенью W при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 2,87$  ГэВ и рожденных частиц, отрицательно (пунктирные линии) и положительно (сплошные линии) заряженных

Для восстановления финальных спектров идентифицированных заряженных легких адронов требовалась чистота спектров не менее 95 % для пионов и протонов, а также не менее 90 % для каонов, с целью минимизации в будущем систематических погрешностей измерений. Такое требование влечет за собой сужение диапазона значений поперечного импульса, в котором восстанавливаемый спектр удовлетворяет всем условиям разработанной методики. Дополнительно пришлось ввести ограничение на минимальное значение поперечного импульса в связи с неоднородностью фазового пространства восстановленных треков частиц, доступного для анализа.

После выполнения всех описанных критериев и ограничений выход рассматриваемых идентифицированных заряженных легких адронов определялся как количество восстановленных адронов. Выходы заряженных адронов корректировались с учетом эффективности восстановления и чистоты отбора для получения дифференциального выхода заряженного адрона по следующей формуле [14]:

$$\frac{d^2N}{dp_T dy} = \frac{N(p_T)}{N_{ev}\varepsilon(p_T)\rho(p_T)\Delta p_T\Delta y},$$



где  $y$  — быстрота  $\pi^{\pm}$ ,  $K^{\pm}$ -мезонов или протонов;  $p_T$ , ГэВ/ $c$ , — их поперечный импульс;  $\Delta p_T$ , ГэВ/ $c$ ,  $\Delta y$  — диапазоны поперечных импульсов и быстрот, в пределах которых определяется их выход  $N(p_T)$ ;  $\varepsilon(p_T)$  — эффективность восстановления спектров поперечных импульсов;  $\rho(p_T)$  — чистота восстанавливаемых спектров;  $N_{ev}$  — число анализируемых столкновений Xe + W.

В итоге из двух восстановленных спектров, полученных в результате проведения кванзинезависимых процедур, путем объединения получался финальный дифференциальный спектр (в зависимости от значений поперечного импульса). В области перекрытия двух спектров выбирался спектр с меньшими значениями относительных статистических погрешностей.

### Результаты расчетного восстановления спектров

На рис. 3 представлены дифференциальные спектры заряженных пионов, каонов и протонов, полученные в виртуальных столкновениях Xe + W при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 2,87$  ГэВ в разных диапазонах центральности столкновения; эти спектры были восстановлены с помощью специально разработанной методики, описанной выше. На этом же рисунке для сравнения представлены реальные спектры по поперечному импульсу для исследуемых

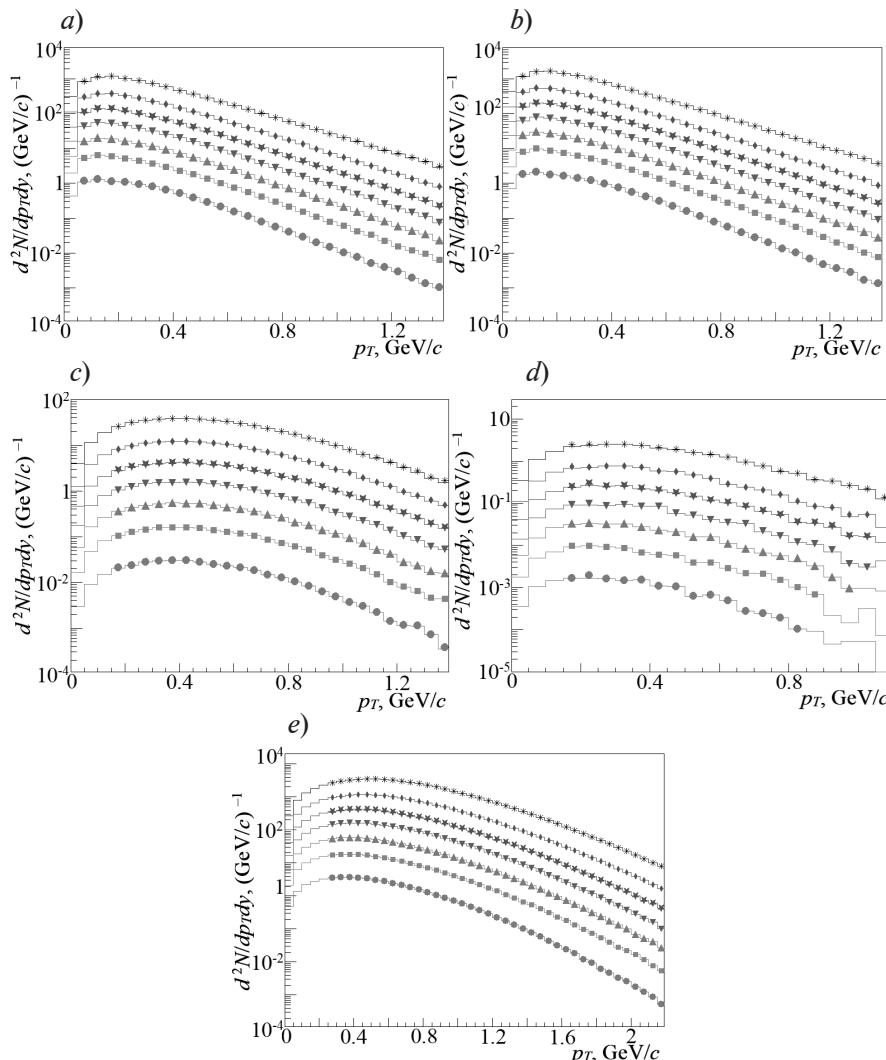


Рис. 3. Восстановленные спектры по поперечному импульсу (символы) и аналогичные спектры, первоначально смоделированные генератором событий (линии) для  $\pi^+$  (a),  $\pi^-$  (b),  $K^+$  (c),  $K^-$  (d) мезонов и протонов  $p$  (e) в диапазоне быстрот  $-0,5 < y_{\text{CMS}} < 0$ .

Восстановлены для столкновений ядер Xe + W при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 2,87$  ГэВ и семи интервалов по центральности, %: 0 – 10 (\*), 10 – 20 (♦), 20 – 30 (\*), 30 – 40 (▼), 40 – 50 (▲), 50 – 60 (■) и 60 – 90 (●).

Для наглядности спектры показаны на одном графике (поэтому соответственно увеличены)

адронов, смоделированные генератором событий. Видно, что для спектров характерно подобие, что однозначно свидетельствует о правильности применения разработанной в работе методики анализа.

Эта методика позволяет измерять спектры рассматриваемых легких адронов:

заряженных пионов  $\pi^\pm$  в области центральных быстрот при  $p_T > 0,05 \text{ ГэВ}/c$ , что соответствует примерно 96 % от общего выхода положительно (отрицательно) заряженных пионов;

заряженных каонов  $K^\pm$  при  $p_T > 0,15 \text{ ГэВ}/c$ , что соответствует примерно 93 (89) % от общего выхода положительно(отрицательно) заряженных каонов;

протонов  $p$  при  $p_T > 0,25 \text{ ГэВ}/c$ , что соответствует примерно 89 % от общего выхода протонов.

Представленная методика обладает простотой и преимуществом использования минимального числа модельно-зависимых поправок, требующих систематического изучения, а также дает возможность быстро получать результаты при наличии экспериментальных данных.

Представленные результаты демонстрируют, что разработанная методика позволяет восстанавливать спектры в области значений поперечного импульса, необходимых для анализа интегральных выходов, средних значений поперечного импульса, аппроксимации спектров различными функциями для определения температуры кинетической заморозки и средней скорости коллективного потока частиц, а также для получения других термодинамических параметров.

### Заключение

Таким образом, в статье представлены результаты исследования возможности измерять свойства  $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$ -мезонов и протонов в столкновениях ядер ксенона с неподвижной мишенью из вольфрама при кинетической энергии налетающего пучка  $E_{kin} = 2,5A \text{ ГэВ}$  с помощью экспериментальной установки на ускорителе NICA.

На основе модельных расчетов получены оценки основных параметров процесса в зависимости от поперечного импульса, таких как чистоты восстанавливаемого спектра в экспериментальной установке MPD, эффективности восстановления спектров в этой установке и спектров по поперечному импульсу для  $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$ -мезонов и протонов.

Установлено, что накопление более 15 млн. рассматриваемых столкновений достаточно для идентификации и восстановления свойств заряженных адронов с удовлетворительной точностью для изучения рождения  $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$ -мезонов и протонов в широкой области поперечных импульсов в области центральных быстрот с интервалом 10% для центральных и полуцентральных столкновений, а также с интервалом 30% для периферийных.

Представленная в статье методика восстановления спектров идентифицированных заряженных адронов достаточно проста и требует использования минимального числа модельно-зависимых поправок. Показано, что методика позволяет восстанавливать спектры, подходящие для получения интегральных выходов, средних значений поперечного импульса и термодинамических параметров на их основе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бердников Я. А., Иванищев Д. А., Котов Д. О., Малаев М. В., Рябов А. Ю. Возможности измерять свойства  $\phi(1020)$ -мезона в столкновениях ядер висмута при энергии 9,2 ГэВ в ускорителе NICA на экспериментальной установке MPD // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2025. Т. 18. № 1. С. 129–141.
2. Бердников Я. А., Иванищев Д. А., Котов Д. О., Малаев М. В., Рябов А. Ю. Возможности измерять свойства заряженных  $K^*(892)$ -мезонов и  $\Sigma(1385)$ -барионов в столкновениях ядер висмута при энергии 9,2 ГэВ в ускорителе NICA на экспериментальной установке MPD // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2025. Т. 18. № 2. С. 119–131.
3. Adcox K., Adler S. S., Afanasiev S., et al. (PHENIX Collaboration). Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus–nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX Collaboration // Nuclear Physics A. 2005. Vol. 757. No. 1–2. Pp. 184–283.



4. Acharya S., Adamová D., Adler A., et al. (ALICE Collaboration). The ALICE experiment: a journey through QCD // The European Physical Journal C. 2024. Vol. 84. No. 8. P. 813.
5. Adhikary H., Adrich P. Search for a critical point of strongly-interacting matter in central 40Ar + 45Sc collisions at  $13 \text{ A} - 75 \text{ A}$  GeV/c beam momentum // The European Physical Journal C. 2024. Vol. 84. No. 7. P. 741.
6. Taranenko A. Results from the RHIC Beam Energy Scan // EPJ Web of Conferences. 2017. Vol. 164. 05 December. P. 06005.
7. Ablyazimov T., Abuhoza A., Adak R. P. T., et al. Challenges in QCD matter physics – The scientific programme of the Compressed Baryonic Matter experiment at FAIR // The European Physical Journal A. 2017. Vol. 53. No 3. P. 60.
8. Zhou X., Yang J., the HIAF project team. Status of the high-intensity heavy-ion accelerator facility in China // AAPPS Bulletin. 2022. Vol. 32. November 08. P. 35.
9. Abgaryan V., Acevedo Kado R., Afanasyev S. V., et al. Status and initial physics performance studies of the MPD experiment at NICA // The European Physical Journal A. 2022. Vol. 58. No. 7. P. 140.
10. Ivanishchev D., Kotov D., Malaev M., Riabov V., Riabov Y. Resonance reconstruction in the MPD // Particles. 2021. Vol. 4. No. 1. Pp. 29–36.
11. Abdulameer N. J., Acharya U., Adare A. Identified charged-hadron production in  $p + \text{Al}$ ,  ${}^3\text{He}$  + Au, and Cu + Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV and in U + U collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 193$  GeV // Physical Review C. 2024. Vol. 109. No. 5. P. 054910.
12. Workman R. L., Burkert V. D., Crede V., et al. (Particle Data Group and Others). Review of particle physics // Progress of Theoretical and Experimental Physics. 2022. Vol. 2022. No. 8. P. 083C01.
13. Bleicher M., Zabrodin E., Spieles C., et al. Relativistic hadron-hadron collisions in the ultra-relativistic quantum molecular dynamics model // Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics. 1999. Vol. 25. No. 9. P. 1859–1896.
14. Бердников Я. А., Иванишев Д. А., Котов Д. О., Рябов В. Г., Рябов Ю. Г. Рождение короткоживущих нейтральных каонов в столкновениях ядер дейтерия и золота при энергии 200 ГэВ // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2011. № 3 (129). С. 134–139.

## REFERENCES

1. Berdnikov Ya. A., Ivanishchev D. A., Kotov D. O., et al., Feasibility to measure the properties of  $\phi(1020)$  meson in collisions of bismuth nuclei at an energy of 9.2 GeV in the NICA collider using the MPD experimental setup, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 18 (1) (2025) 129–141 (in Russian).
2. Berdnikov Ya. A., Ivanishchev D. A., Kotov D. O., et al., Feasibility to measure the properties of charged  $K^*(892)$  mesons and  $\Sigma(1385)$  baryons in collisions of bismuth nuclei at an energy of 9.2 GeV in the NICA collider using the MPD experimental setup, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 18 (2) (2025) 119–131 (in Russian).
3. Adcox K., Adler S. S., Afanasiev S. V., et al. (PHENIX Collaboration), Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus–nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX Collaboration, Nucl. Phys. A. 757 (1–2) (2005) 184–283.
4. Acharya S., Adamová D., Adler A., et al. (ALICE Collaboration), The ALICE experiment: a journey through QCD, Eur. Phys. J. C. 84 (8) (2024) 813.
5. Adhikary H., Adrich P., Search for a critical point of strongly-interacting matter in central 40Ar + 45Sc collisions at  $13 \text{ A} - 75 \text{ A}$  GeV/c beam momentum, Eur. Phys. J. C. 84 (7) (2024) 741.
6. Taranenko A., Results from the RHIC Beam Energy Scan, EPJ Web Conf. 164 (05 Dec) (2017) 06005.
7. Ablyazimov T., Abuhoza A., Adak R. P. T., et al. Challenges in QCD matter physics – The scientific programme of the Compressed Baryonic Matter experiment at FAIR, Eur. Phys. J. A. 53 (3) (2017) 60.
8. Zhou X., Yang J., the HIAF project team, Status of the high-intensity heavy-ion accelerator facility in China, AAPPS Bull. 32 (1) (2022) 35.

9. Abgaryan V., Acevedo Kado R., Afanasyev S. V., et al., Status and initial physics performance studies of the MPD experiment at NICA, *Eur. Phys. J. A.* 58 (7) (2022) 140.
10. Ivanishchev D., Kotov D., Malaev M., et al., Resonance reconstruction in the MPD, *Particles.* 4 (1) (2021) 29–36.
11. Abdulameer N. J., Acharya U., Adare A., Identified charged-hadron production in  $p + \text{Al}$ ,  ${}^3\text{He} + \text{Au}$ , and  $\text{Cu} + \text{Au}$  collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$  and in  $\text{U} + \text{U}$  collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 193 \text{ GeV}$ , *Phys. Rev. C.* 109 (5) (2024) 054910.
12. Workman R. L., Burkert V. D., Crede V., et al. (Particle Data Group and Others), Review of particle physics, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2022 (8) (2022) 083C01.
13. Bleicher M., Zabrodin E., Spieles C., et al., Relativistic hadron-hadron collisions in the ultra-relativistic quantum molecular dynamics model, *J. Phys. G.: Nucl. Part. Phys.* 25 (9) (1999) 1859–1896.
14. Berdnikov Ya. A., Ivanishchev D. A., Kotov D. O., et al.,  $K_s$ -mesons production in  $d + \text{Au}$  collisions at center-of-mass energy of 200 GeV per nucleon pair, *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics.* (3 (129)) (2011) 134–139 (in Russian).

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**БЕРДНИКОВ Ярослав Александрович** – доктор физико-математических наук, профессор Высшей школы фундаментальных физических исследований Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
yberdnikov1947@gmail.com  
ORCID: 0000-0003-0309-5917

**ИВАНИЩЕВ Дмитрий Александрович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Высшей школы фундаментальных физических исследований Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург; ученый секретарь отделения физики высоких энергий Петербургского института ядерной физики им. Б. П. Константина НИЦ «Курчатовский институт», г. Гатчина Ленинградской области, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
ivanishchev\_da@pnpi.nrcki.ru  
ORCID: 0000-0003-3298-3702

**КОТОВ Дмитрий Олегович** – кандидат физико-математических наук, доцент Высшей школы фундаментальных физических исследований Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
Dmitriy.kotov@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-3395-0454

**МАЛАЕВ Михаил Владимирович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Высшей школы фундаментальных физических исследований Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
Mmalayev@gmail.com  
ORCID: 0009-0001-9974-0169

### THE AUTHORS

#### **BERDNIKOV Yaroslav A.**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University  
29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia  
yberdnikov1947@gmail.com  
ORCID: 0000-0003-0309-5917

**IVANISHCHEV Dmitry A.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
Petersburg Nuclear Physics Institute named by B. P. Konstantinov of NRS “Kurchatov Institute”  
29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia  
ivanishchev\_da@pnpi.nrcki.ru  
ORCID: 0000-0003-3298-3702*

**KOTOV Dmitry O.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University  
29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia  
Dmitriy.kotov@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-3395-0454*

**MALAEV Mikhail V.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University  
29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia  
Mmalayev@gmail.com  
ORCID: 0009-0001-9974-0169*

*Статья поступила в редакцию 24.05.2025. Одобрена после рецензирования 10.06.2025.  
Принята 10.06.2025.*

*Received 24.05.2025. Approved after reviewing 10.06.2025. Accepted 10.06.2025.*