УТВЕРЖДАЮ

Директор Лаборатории физики высоких энергий

им. В.И. Векслера и А.М. Балдина

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_
« » 2023г.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Научно-технического совета

Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина

Объединенного института ядерных исследований

 Диссертация «Алгоритмы и программное обеспечение для реконструкции траекторий заряженных частиц в детекторных системах перед анализирующим магнитом эксперимента BM@N» выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина.

 В 2015 году В.В. Ленивенко окончила Международный университет природы общества и человека «Дубна» по специальности «физика». С 2015 года принята в ЛФВЭ, с 2020 года работает на должности научного сотрудника.

 В период подготовки диссертации Ленивенко Василиса Викторовна работала в Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина.

 Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2023 году.

 Научный руководитель – кандидат физико-математических наук В.В. Пальчик, ведущий научный сотрудник научно-технического отдела программного и информационного обеспечения, Сектор №2 Лаборатории Информационных Технологий им. М.Г. Мещерякова.

 Административный руководитель – доктор физико-математических наук М.Н. Капишин, начальник отдела Отделение №3 Физики адронов, Научно-экспериментальный отдел барионной материи на Нуклотроне Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина.

**По итогам обсуждения принято следующее заключение:**

 В автореферате представлены следующие основные результаты: разработка алгоритмов реконструкции траекторий заряженных частиц в системах координатных детекторов перед анализирующим магнитом и результаты обработки данных в эксперименте BM@N на Нуклотроне в рамках темы № 02-0-1065-2007/2023 Проблемно-тематического плана ОИЯИ «Комплекс NICA: создание комплекса ускорителей, коллайдера и экспериментальных установок на встречных и выведенных пучках ионов для изучения плотной барионной материи, спиновой структуры нуклонов и легких ядер, проведения прикладных и инновационных работ».

 **Актуальность задачи:**

 Рабочая экспериментальная установка BM@N предназначена для изучения свойств барионной материи в экстремально горячем и плотном веществе при взаимодействии пучков Нуклотрона с неподвижной мишенью, которая является первым этапом реализации физической программы ускорительного комплекса NICA.

 Актуальной задачей является разработка комплексов программ для реконструкции треков заряженных частиц внутри многопроволочных пропорциональных камер MWPC (MultiWire Proportional Chambers) и впервые используемых кремниевых детекторов SiDet (Silicon Detectors), которые располагались перед анализирующим магнитом в эксперименте BM@N, а именно полная реконструкция траекторий заряженных частиц, начиная от формирования хитов и до полной реконструкции траекторий частиц в этих детекторах.

**Научная новизна:**

1. Улучшенный отбор сигналов в MWPC c исключением ложных срабатываний до и после мишени с учетом временных отсчетов в условиях большой зашумленности данных. С учетом геометрии камеры MWPC разработан специальный алгоритм построения трек-сегментов.
2. В условиях неоптимального расположения SiDet станций и близости измерений по обеим координатам (XX’) в станции разработан оригинальный алгоритм построения треков в системе SiDet, включая случаи с минимально возможной информацией.
3. В программный комплекс BmnRoot внедрены программные реализации разработанных алгоритмов для моделирования сигнала от моделированных событий, а также алгоритмы формирования кластеров, построения трек-сегментов, реконструкции траекторий заряженных частиц в детекторных системах до магнита в MWPC и SiDet для моделированных и экспериментальных событий.
4. Впервые разработан алгоритм реконструкции траекторий заряженных частиц, проходящих через две детекторные системы MWPC и SiDet перед магнитом для эксперимента SRC на BM@N.

**Научно-практическая значимость работы:**

1. Алгоритмы реализованы в комплексах программ и внедрены в ПО эксперимента BM@N. С помощью созданных программных средств обработаны экспериментальные данные, набранные на экспериментальной установке в 2017, 2018 и 2022 годах. Всего, на текущий момент, при помощи созданного программного обеспечения обработаны около 500 миллионов экспериментальных событий. Разработанное программное обеспечение доступно по ссылкам:
https://git.jinr.ru/nica/bmnroot/-/tree/dev/detectors/mwpc

https://git.jinr.ru/nica/bmnroot/-/tree/dev/detectors/silicon

https://git.jinr.ru/nica/bmnroot/-/tree/dev/reconstruction/globaltracking;

1. С помощью разработанных алгоритмов восстановления траекторий в MWPC и SiDet успешно выполнена физическая программа по короткодействующим корреляциям (Short Range Correlations – SRC) в эксперименте BM@N [A4];
2. Оценены эффективности и разрешения детекторных систем MWPC и SiDet при различных условиях набора данных;
3. Разработанные алгоритмы являются универсальными и используются как для конфигурации подпроекта SRC на BM@N, так и для основной конфигурации эксперимента BM@N.

**Научно-технический совет ЛФВЭ отмечает следующие наиболее важные результаты данной работы, в получении которых В.В. Ленивенко внесла определяющий вклад:**

* Разработан и протестирован алгоритм реконструкции траекторий заряженных частиц в системе камер MWPC до и после мишени и алгоритм реконструкции в системе кремниевых детекторов SiDet.
* Разработан и протестирован алгоритм реконструкции траекторий заряженных частиц через объединённую систему MWPC и SiDet, с помощью которых реконструированы треки.
* Программная реализация алгоритмов, интегрированных в ПО эксперимента, позволила получить результаты в ходе первого физического анализа данных для эксперимента SRC на установке BM@N.
* С использованием методов математической статистики на моделированных данных оценено отношение $\frac{C^{12}(p,2p)B^{10}}{C^{12}(p,2p)B^{11}}$ выходов частиц конечного состояния исследуемых реакций, которое согласуется с экспериментальным значением.
* Предложенные методы и алгоритмы являются универсальными и используются для эксперимента SRC на установке BM@N и основного эксперимента BM@N.

Работа выполнена при поддержке следующих грантов, стипендий и дипломов ПКК:

* грант РФФИ 18-02-40046 «Анализ данных в эксперименте BM@N по изучению короткодействующих двухнуклонных корреляций во взаимодействии пучка ядер углерода с протонной мишенью»
* грант ОМУС 2023 год;
* поощрительные стипендии А.М. Балдина – 2022, 2021, 2020 годов;
* 51е и 52е заседание Программно-Консультативного Комитета по физике частиц, стендовые доклады (отмечены дипломами второй степени).

По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, опубликованных в рецензируемых изданиях, соответствующих требованиям к публикациям положения о присуждении ученых степеней в ОИЯИ (пр. ОИЯИ от 11.02.2022 № 132).

# Список публикаций автора по теме диссертации:

1. Lenivenko V., Palichik V., Patsyuk M., Reconstruction of simulated and experimental data in coordinate detector systems in front of the analyzing magnet of SRC at BM@N experiment in 2018 // препринт E10-2023-11, Издательский отдел ОИЯИ, 2023
2. Lenivenko V., Patsyuk M., Palichik V., SRC at BM@N: reconstruction of tracks upstream and downstream the target using the MWPC and Silicon detector systems // AIP Conference Proceedings, 2021, v. 2377, p. 030010.
3. Lenivenko V., Palichik V., Reconstruction of Charged-Particle Trajectories in Multiwire Proportional Chambers at the BM@N Experiment // Physics of Particles and Nuclei Letters, 2018, v. 15, p. 637-649.
4. Patsyuk M., Kahlbow J., Laskaris G., Duer M., Lenivenko V., et al., Unperturbed inverse kinematics nucleon knockout measurements with a carbon beam // Nature Physics, 2021, v.17, p. 693.
5. Patsyuk M., Atovullaev T., Corsi A., Hen O., Johansson G., Kahlbow J., Lenivenko V., et al., BM@N data analysis aimed at studying SRC pairs: one-step single nucleon knockout measurement in inverse kinematics out of a 48 GeV/c 12C nucleus // Physics of Particles and Nuclei, 2021, v. 52, p. 631–636.
6. Galavanov A., Khabarov S., Kirushin Y., Kulish E., Lenivenko V., et al., Studies of Short-Range Correlations in inverse kinematics at BM@N at the NICA facility // J. Phys.: Conf. Ser., 2019, v. 1390, p. 012025.
7. Khabarov S., Kulish E., Lenivenko V., Makankin A., Maksymchuk A., Palichik V., et al., First glance at the tracking detectors data collected in the first BM@N SRC run // EPJ Web of Conferences, 2019, v. 201, p. 04002.

Основные положения и результаты, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на международных и российских конференциях, а также на рабочих совещаниях:

* Collaboration Meetings of the BM@N Experiment at the NICA Facility – 2021, 2020, 2019 годы;
* международная научная конференция молодых ученых и специалистов ОИЯИ – 2021, 2020, 2018, 2016 годы;
* школа-конференция молодых ученых и специалистов ОИЯИ Алушта –

2021, 2016;

* заседания Программно-Консультативного Комитета по физике частиц, Дубна, 2020, 2019, 2017 (стендовый доклад);
* the 18th International Conference on Strangeness in Quark Matter (SQM 2019), Бари, Италия, 2019, (стендовый доклад);
* the International Conference on Particle Physics and Astrophysics ICPPA – 2018, 2017 годы;
* international Conference on Mathematical Modeling and Computational Physics (MMCP), Дубна, 2017;
* на постоянной основе выступления на внутренних собраниях и еженедельных совещаниях профильных подгрупп.

 Диссертационная работа Ленивенко В.В. удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» и является законченной научно-квалификационной работой.

 НТС ЛФВЭ ОИЯИ рекомендует диссертацию к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» в диссертационном совете Лаборатории информационных технологий ОИЯИ.

 Заключение принято Научно-техническим советом Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина Объединенного института ядерных исследований.

 Проголосовало членов НТС ЛФВЭ из полного состава численностью человек.

 Результаты голосования: «за» - чел., «против» - , «воздержалось» - ,

Протокол № от 2023 года.

Заключение составил

д.ф.-м.н. Мадигожиным Д.Т.

Председатель НТС ЛФВЭ

Ученый секретарь НТС ЛФВЭ