УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора Лаборатории физики высоких энергий

им. В.И. Векслера и А.М. Балдина

А.В. Бутенко

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_2025 года

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Научно-технического совета

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

Объединенного института ядерных исследований

Диссертация **Кожевниковой Марины Евгеньевны** «**Моделирование рождения легких ядер и гиперядер в столкновениях тяжелых ионов в термодинамическом подходе, реализованном в генераторе THESEUS**» выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина.

Кожевникова М.Е. в 2010 г. окончила бакалавриат Южного Федерального Университета, (физический факультет), г. Ростов-на-Дону, с присвоением степени бакалавра физики, и в 2012 г. окончила Московский физико-технический институт (факультет общей и прикладной физики) по направлению «Прикладные математика и физика» с присвоением степени магистра прикладных математики и физики. Также окончила аспирантуру УНЦ ОИЯИ в 2016г.

В период подготовки диссертации с 2018 по 2025 гг. соискатель работала в Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина в должности младшего научного сотрудника (2018-2023 гг.) и научного сотрудника (с 2023г.).

Экзамены кандидатского минимума сданы, удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2025 г. Университетом «Дубна» (справка № 725).

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, Иванов Юрий Борисович, ведущий научный сотрудник ЛТФ ОИЯИ.

**По итогам обсуждения, НТС ЛФВЭ отмечает:**

Диссертационная работа М.Е. Кожевниковой посвящена исследованию свойств ядерной материи в экстремальных условиях (при высоких температурах и плотностях), рождающейся в ядерных столкновениях.

Основным источником информации о свойствах рождающейся ядерной материи и динамике столкновений являются экспериментально детектируемые адроны и легкие ядра, образующиеся в результате столкновения. В диссертации разработан новый термодинамический подход к образованию лёгких ядер и гиперядер в ядерных столкновениях. На основе этого подхода выполнен анализ имеющихся экспериментальных данных. Этот подход реализован в генераторе событий THESEUS (Three-fluid Hydrodynamics-based Event Simulator Extended by UrQMD final State interactions), который позволяет выполнять 3D гибридное (3D гидродинамика на начальной стадии - переход к описанию в терминах частиц - взаимодействие адронов в конечном состоянии) моделирование ядерных столкновений с нетривиальными уравнениями состояния, включающими фазовый переход в кварк-глюонную фазу. В рамках этого описания легкие ядра, гиперядра и адроны описываются единым образом на основе термодинамических параметров, получаемых из гидродинамического моделирования. Это выгодно отличает THESEUS от других моделей простотой и дает возможность предсказывать результаты будущих экспериментов на ускорительном комплексе NICA без привлечения дополнительных феноменологических параметров.

Работа проводилась в соответствии с проблемно-тематическим планом ОИЯИ по теме 02-1-1065-2007/2026 «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**:

В настоящее время исследование столкновений тяжелых ионов и изучение образующихся в результате легких ядер является актуальной задачей как с теоретической, так с экспериментальной точки зрения. Ожидается, что увеличенный выход легких ядер служит индикатором достижения критической точки, а также области спинодальной неустойчивости на фазовой диаграмме КХД.

Существует несколько ускорительных комплексов, на которых изучается или планируется изучать ядро-ядерные столкновения при умеренно релятивистских энергиях, в которых достигаются высокие барионные плотности. Так, уже действуют SPS (Super Proton Synchrotron) в ЦЕРН, программа BES (Beam Energy Scan) на коллайдере RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) в Брукхейвенской национальной лаборатории в США, Нуклотрон в ОИЯИ (Дубна), на этапе постройки находится ускорительный комплекс FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) в г. Дармштадт (Германия) и уже готовится к запуску комплекс NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) в г.Дубна.

При умеренно релятивистских этих энергиях значительная часть барионного заряда испускается в составе легких ядер даже в центральных столкновениях. Это требует корректного описания рождения легких ядер наравне с другими адронами. Эксперименты с тяжелыми ионами дают нам информацию о времени жизни и энергиях связи легких гиперядер, что дает понимание гиперон-нуклонных взаимодействий и роли симметрии аромата, важных для изучения структуры ядра и астрофизики, а также для построения адронного уравнения состояния для приложений к столкновениям тяжелых ионов.

Ввиду всего вышеизложенного, актуальной задачей является разработка модели для описания легких (гипер)ядер, основанной на термодинамическом подходе в рамках полномасштабного 3D гибридного моделирования ядерных столкновений.

**Научная новизна**:

В настоящей работе разработан новый подход к моделированию легких (гипер)ядер в столкновениях тяжелых ионов, основанный на термодинамическом описании в рамках полномасштабного 3D гибридного моделирования ядерных столкновений, в котором адроны и легкие (гипер)ядра рассматриваются единообразно. Этот подход реализован в обновленной версии генератора THESEUS.

В этом подходе не требуются феноменологические параметры или обширные дополнительные данные. Температуры и химические потенциалы не фитируются, как в статистической модели, а рассчитываются в гидродинамической модели 3FD (Three-Fluid Dynamics), исходя из начальных условий и уравнения состояния.

Разработанный подход впервые применен к анализу данных по рождению легким ядрам в столкновениях Au+Au и Pb+Pb при энергиях $\sqrt{s\_{NN}}=3−19.6$ГэВ и при различных центральностях. Также проведено аналогичное исследование для гиперядер, таких как гипертритий $$ и гипергелий $$, в столкновениях Au+Au при энергии $\sqrt{s\_{NN}}=3$ ГэВ. Таким образом, данная диссертационная работа имеет научную новизну как в разработке метода, так и его применения к описанию данных.

**Теоретическая и практическая значимость работы**:

Разработанная обновленная версия генератора THESEUS дает возможность делать предсказания для текущих и будущих экспериментов на новом ускорительном комплексе NICA .

Кроме того, термодинамический подход к образованию легких ядер сам по себе имеет теоретический интерес. Полученное разумное согласие с экспериментальными данными показывает, что термодинамический подход применим к описанию рождения не только различных адронов, но и таких деликатных объектов, как легкие (гипер)ядра, энергии связи которых много меньше энергии возбуждения ядерной среды.

Поскольку в настоящей версии модели 3FD, дополненной генератором THESEUS, отсутствуют критическая точка и флуктуации, характерные для спинодальной неустойчивости, генератор THESEUS дает некоторое реперное предсказание выходов легких ядер. Заметное превышение экспериментальных выходов (гипер)ядер над результатами этого реперного предсказания в некоторой области энергий столкновения может указывать на присутствие критической точки и/или спинодальной неустойчивости на фазовой диаграмме.

**Научно-технический совет ЛФВЭ ОИЯИ отмечает следующие наиболее важные результаты диссертационной работы:**

* Разработанная новая версия генератора THESEUS позволяет моделировать легкие (гипер)ядра на основе термодинамического подхода принципиально новым способом по сравнению с имеющимися на данный момент моделями и имеет преимущество в простоте входных параметров и предсказательной силе. Код обновленного генератора находится в свободном доступе и доступен по ссылке <https://github.com/yukarpenko/3fd_generator/tree/urqmd_recalc_muB>.
* Термодинамический подход в сочетании с гидродинамическим описанием динамики ядро-ядерных столкновений Au+Au и Pb+Pb при энергиях $\sqrt{s\_{NN}}=3−19.6$ ГэВ дает удовлетворительное описание экспериментальных данных (NA49 и STAR) по рождению легких ядер (дейтроны, тритоны, ядра гелия $$ и $$).
* Термодинамический подход дает удовлетворительное описание экспериментальных данных (STAR) по рождению легких гиперядер (таких как гипертритий $$ и гипергелий $$) в столкновениях Au+Au при энергии $\sqrt{s\_{NN}}=3$ ГэВ.
* Выходы легких ядер слабо зависят от уравнения состояния ядерной материи в рассмотренной области энергий. В то же время направленный поток протонов и легких ядер оказался очень чувствительным к уравнению состояния при $\sqrt{s\_{NN}}\geq 7.7$ ГэВ, что указывает на присутствие фазового перехода в кварк-глюонную фазу при этих энергиях столкновения.
* Вклад от распадов нестабильных состояний $$\* сильно влияет на выходы легких ядер при энергии $\sqrt{s\_{NN}}=3$ ГэВ и оказывается несущественным при $\sqrt{s\_{NN}}\geq 7.7$ ГэВ.
* Для хорошего описания легких ядер c массовым числом A = 2 и 3 требуется позднее (по сравнению со стандартным для адронов) замораживание, а для $$ предпочтительно стандартное.

**Личный вклад соискателя:**

Содержание диссертации и положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора. Автор принимала активное участие во всех этапах работы. Её вклад является определяющим в разработке и тестировании программного кода, существенным в проведении численных расчётов и получении физических результатов. Автор неоднократно лично представляла полученные результаты на международных конференциях. Также автор принимала активное участие в подготовке публикаций. Все выносимые на защиту результаты получены при определяющем участии автора.

**Содержание диссертации отражено в следующих публикациях, в том числе – в 6 публикациях из списка ВАК/ Web of Science/ Scopus:**

1. Blaschke D., Röpke G., Ivanov Y., Kozhevnikova M., Liebing S. Strangeness and light fragment production at high baryon density // Springer Proceedings in Physics / ed. by D. Elia et al. — 2020. — Vol. 250. — P. 183–190. — arXiv: 2001.02156 [nucl-th].
2. Blaschke D., Friesen A. V., Ivanov Y. B., Kalinovsky Y. L., Kozhevnikova M., Liebing S., Radzhabov A., Röpke G. QCD Phase Diagram at NICA Energies: ${K^{+}}/{π^{+}}$ Horn Effect and Light Clusters in THESEUS // Acta Physica Polonica B, Proceedings Supplement. — 2021. — Vol. 14, no. 3. — P. 485–489. — arXiv: 2004.01159 [hep-ph].
3. Kozhevnikova M., Ivanov Y. B., Karpenko I., Blaschke D., Rogachevsky O. Update of the Three-fluid Hydrodynamics-based Event Simulator: light-nuclei production in heavy-ion collisions // Phys. Rev. C. — 2021. — Vol. 103, no. 4. — P. 044905. — arXiv: 2012.11438 [nucl-th].
4. Kozhevnikova M., Ivanov Y. B. Light-nuclei production in heavy-ion collisions within a thermodynamical approach // Phys. Rev. C. — 2023. — Vol. 107, no. 2. — P. 024903. — arXiv: 2210.07334 [nucl-th].
5. Kozhevnikova M., Ivanov Y. B. Light-Nuclei Production in Heavy-Ion Collisions at $\sqrt{s\_{NN}}=6.4−19.6$ GeV in THESEUS Generator Based on Three-Fluid Dynamics // Particles. — 2023. — Vol. 6, no. 1. — P. 440–450.
6. Kozhevnikova M., Ivanov Y. B. Light Nuclei Production in Au+Au Collisions at $\sqrt{s\_{NN}}=3$ GeV within Thermodynamical Approach: Bulk Properties and Collective Flow // Phys. Rev. C. — 2024. — Vol. 109, no. 1. — P. 014913. — arXiv: 2311.08092 [nucl-th].
7. Kozhevnikova M., Ivanov Y. B. Production of light hypernuclei in Au+Au collisions at $\sqrt{s\_{NN}}=3$ GeV within a thermodynamic approach // Phys. Rev. C. — 2024. — Vol. 109, no. 3. — P. 034901. — arXiv: 2401.04991 [nucl-th].

**Основные результаты диссертационной работы докладывались автором на конференциях и семинарах:**

* Light clusters in nuclei and nuclear matter: Nuclear structure and decay, heavy ion collisions, and astrophysics, The European Centre for Theoretical Studies in Nuclear Physics and Related Areas (ECT\*), Тренто, Италия, 2019. Доклад: "Production of light clusters in generator THESEUS".
* 10th International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP 2021), Колимбари, Крит, Греция. Доклад: "Light-nuclei production in heavy-ion collisions in Three-fluid Hydrody-namics-based Event Simulator (THESEUS)".
* 6th International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA 2022), МИФИ, Москва, Россия. Доклад: "Light-nuclei production in heavy-ion collisions at $\sqrt{s\_{NN}}=6.4−19.6$ GeV in THESEUS generator based on 3-fluid dynamics".
* 11th International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP 2022), Колимбари, Крит, Греция. Доклад: "Light-nuclei production in heavy-ion collisions at at $\sqrt{s\_{NN}}=6.4−19.6$ GeV in 3-fluid dynamics".
* Workshop on physics performance studies at NICA (NICA-2022), МИФИ (через ZOOM), Москва, Россия. Доклад: "Light-nuclei production in heavy-ion collisions at at $\sqrt{s\_{NN}}=6.4−19.6$ GeV in THESEUS generator based on 3-fluid dynamics".
* 12th International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP 2023), Колимбари, Крит, Греция. Доклад: "Light-nuclei production in heavy-ion collisions at the energy range of at $\sqrt{s\_{NN}}=6.4−19.6$ GeV in generator THESEUS based on 3-fluid dynamical model".
* JINR Association of Young Scientists and Specialists Conference "Alushta-2023", ОИЯИ, Алушта, Россия. Доклад: "Light-nuclei production in heavy-ion collisions at NICA energies in generator THESEUS based on 3-fluid dynamical model".
* Workshop on physics performance studies at NICA (NICA-2024), (через ZOOM), Москва, Россия. Доклад: " Proton, Lambda and light (hyper)nuclei production in Au+Au collisions at 3 GeV. Bulk properties and directed flow".
* 61st meeting of the PAC for Particle Physics (2025), Дубна, Россия. Постер: "Modelling of light (hyper)nuclei production in heavy-ion collisions at NICA energies based on generator THESEUS".
* Методический семинар: EMMI Nuclear and Quark Matter seminar (GSI), онлайн, 2021. Тема семинара: "Update of the Three-fluid Hydrodynamics-based Event Simulator (THESEUS) and light-nuclei production in heavy-ion collisions".
* Общелабораторный семинар ЛФВЭ, 2025. Тема семинара: "Моделирование легких ядер и гиперядер в столкновениях тяжелых ионов в термодинамическом подходе при помощи генератора THESEUS" (по материалам кандидатской диссертации).

Диссертация «Моделирование рождения легких ядер и гиперядер в столкновениях тяжелых ионов в термодинамическом подходе, реализованном в генераторе THESEUS» Кожевниковой Марины Евгеньевны представляет собой законченный цикл исследований и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий».

НТС ЛФВЭ ОИЯИ рекомендует диссертацию к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий».

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 40 человек. Результаты голосования: «за» - чел., «против» - , «воздержалось» - ,    протокол № 8 от 17 декабря 2024 г.

Заключение составил В. Воронюк

кандидат физ.-мат. наук

Председатель НТС ЛФВЭ Е.А. Строковский

доктор физ.-мат. наук

Ученый секретарь НТС ЛФВЭ С.П. Мерц

кандидат физ.-мат. наук