

На соискание премии имени Векслера выдвигается серия работ:

**«Многофункциональный комплекс ускорителей тяжелых ионов»**

Андрей Валерьевич Бутенко,

Анатолий Олегович Сидорин,

Григорий Владимирович Трубников

1. Агапов Н.Н., **А.В.Бутенко**, А.Д.Коваленко, В.И.Волков, В.Н.Карпинский, **А.О.Сидорин**, **Г.В.Трубников**, Г.Г.Ходжибагиян, Итоги реализации проекта "Нуклотрон-М", Физика элементарных частиц и атомного ядра, том 43, № 4, стр. 916-948, 2012

2. **Бутенко А.В.**, Говоров А.И., Донец Д.Е., Донец Е.Д., Донец Е.Е., Левтеров К.А., Мончинский В.А., **Сидорин А.О.**, **Трубников Г.В.**, Фимушкин В.В., Модернизация инжекционного комплекса нуклотрон, Письма в ЭЧАЯ, т. 9, № 4-5 (174-175), стр. 654-665, 2012

3. **А.О. Сидорин**, **Г.В. Трубников**, Н.А. Шурхно, Экспериментальные и теоретические исследования в ОИЯИ по развитию метода стохастического охлаждения пучков заряженных частиц, Успехи физических наук, Том: 186, № журнала 3, стр. 275-291, 2016

4. **А.В.Бутенко**, В.И.Волков, С.Ю.Колесников, И.Н.Мешков, В.А.Михайлов, **А.О.Сидорин**, А.И.Сидоров, Н.Д.Топилин, **Г.В.Трубников**, А.В.Тузиков, А.А.Фатеев, В.С.Швецов, Каналы транспортировки, системы инжекции и вывода пучка в ускорительном комплексе NICA, Письма в ЭЧАЯ, т. 13, №7, стр. 1507 – 1526, 2016

5. Н.Н. Агапов, В.Д. Кекелидзе, А.Д. Коваленко, Р. Ледницки, В.А. Матвеев, И.Н. Мешков, В.А. Никитин, Ю.К. Потребенников, А.С. Сорин, **Г.В. Трубников**, Релятивистская ядерная физика в ОИЯИ: от синхрофазотрона к коллайдеру NICA, Успехи физических наук, Том: 186, №4, стр. 405-423, 2016

6. **Бутенко А. В.**, Бровко О. И., Галимов А. Р., Горбачёв Е. В., Костромин С. А., Карпинский В. Н., Мончинский В. А., Мешков И. Н., **Сидорин А. О.**, Сыресин Е. М., **Трубников Г. В.**, Тузиков А. В., Филиппов А. В., Ходжибагиян Г. Г., Бустер комплекса NICA: Сверхпроводящий синхротрон нового поколения, Успехи физических наук, том 193, №2, стр. 206-225, 2023

## Представление

На соискание премии имени Векслера выдвигается серия работ, описывающая этапы практической реализации новой концепции ускорительного комплекса для получения ядер от дейтерия до самых тяжелых стабильных элементов с релятивистскими энергиями.

Концепция основана на использовании каскада из двух синхротронов: основной синхротрон ускоряет ядра до энергии эксперимента, а бустерный синхротрон, за счет высокой магнитной жесткости, обеспечивает на выходе высокую эффективность обдирки и не требует от источника получения ионов в высоком зарядовом состоянии.

Данная концепция реализована в ЛФВЭ ОИЯИ в рамках развития проекта NICA. В результате создан комплекс, включающий в себя:

- модернизированный ускоритель Нуклотрон,
- два новых ускорителя: линейный ускоритель тяжелых ионов и промежуточный синхротрон – Бустер,
- необходимые каналы транспортировки пучков.

В ходе пусконаладочного сеанса работы Бустера в 2020 году получена стабильная работа магнитно-криостатной системы на проектном значении магнитной жесткости 25 Тл\*м. Обеспечена инжекция и ускорение пучка, полученного на новом линейном ускорителе тяжелых ионов.

С 2022 года на комплексе начата программа фундаментальных и прикладных исследований на фиксированных мишенях, за этот период комплекс отработал около 5000 часов.

Весной 2022 года осуществлен набор статистики по программе SRC (Short Range Correlations), в рамках которой исследуются глубоко неупругое рассеяние протонов на ядрах углерода с постановкой эксперимента по схеме с обратной кинематикой (релятивистские ядра углерода бомбардируют жидководородную мишень). Реализация такой схемы, позволяющей осуществить полную реконструкцию событий, не имеет аналогов в мире.

В сеансе 2022-2023 г.г. в результате оптимизации работы всех систем достигнута рекордная для Нуклотрона интенсивность пучка ядер ксенона (свыше  $10^7$  ядер за цикл), ускоренных до энергии 3.9 ГэВ/н. Более месяца ускорительный комплекс стабильно отработал на эксперименте VM@N (Baryonic Matter at Nuclotron), на энергии 3.9 ГэВ/нуклон было записано примерно 500 миллионов событий, и еще примерно 50 миллионов на энергии 3 ГэВ/н.

Проведен широкий цикл прикладных исследований по программе коллаборации ARIADNA (Applied Research Infrastructure for Advance Development at NICA facility). Последовательно исследовались защитные свойства, радиационная стойкость и радиомодификация новых композитных материалов для космической отрасли, радиационные модификации в сапфирах ( $Al_2O_3$ ), политерафторэтиленовых, полиэтилентерефталатных, полиэтиленовых и полиимидных пленках. Проведено облучение ВТСП лент с целью изучения возможности повышения критического тока. В рамках программы “PLANTS AND VEGETATION IN SPACE” облучены 16 контейнеров с семенами растений. Проводился активационный анализ материалов при облучении релятивистскими тяжелыми ионами. На установке СОЧИ (Станция Облучения ЧИпов, расположена на выходе линейного ускорителя) было проведено облучение ионами ксенона термо-радиационно-модифицированных политетрафторэтиленовых (ТРМ-ПТФЭ) пленок.

На двух энергиях проведены исследования взаимодействия пучка ксенона с внутренними мишенями Нуклотрона из вольфрама и серебра.

Одним из наиболее ярких «ускорительных» достижений сеансов явилось обеспечение оптимального режима работы системы электронного охлаждения Бустера, что привело к уменьшению поперечных размеров и энергетического разброса пучка на выходе из Бустера, и, как следствие, к двукратному увеличению интенсивности пучка, ускоренного в Нуклотроне. Метод электронного охлаждения, предложенный и впервые реализованный в ИЯФ им. Будкера, нашел применение во многих зарубежных научных центрах. В российской науке электронное охлаждение в ядернофизическом эксперименте использовалось впервые.

Созданный ускорительный комплекс продемонстрировал параметры пучка, необходимые как для ядерно-физических так и прикладных исследований с медленным выводом пучка. Прделанные к настоящему моменту исследования подтверждают, что его дальнейшее развитие позволит получить параметры пучков необходимые для сооружаемого коллайдера NICA.

Создание такого масштабного комплекса потребовало напряженных усилий большого коллектива. Номинанты внесли существенный вклад на все этапах работы, начиная с формулировки концепции.

## **Концепция, положенная в основу ускорительного комплекса**

Создание ускорительного комплекса NICA подразумевало как разработку и сооружение новых ускорительных установок: линейного ускорителя тяжелых ионов и бустерного синхротрона, так и модернизацию и существенное развитие существующего ускорителя – Нуклотрона.

Основной задачей нового бустерного синхротрона являлось обеспечение инжекции в Нуклотрон «голых» ядер (для максимального использования магнитной жесткости Нуклотрона) всех стабильных элементов таблицы Менделеева с интенсивностью не менее  $10^9$  частиц за цикл (для тяжелых ионов).

Для тяжелых ионов эффективность перезарядки в «голые» ядра достигает 80% при энергии примерно 600 МэВ/н. При такой энергии для ионов элементов из середины таблицы Менделеева эффективность перезарядки уже близка к 100%. Если ориентироваться на получение в источнике тяжелых ионов в зарядовом состоянии в районе 30+ (которое к моменту начала проектирования комплекса NICA надежно обеспечивалось несколькими типами источников при интенсивности близкой к требуемой), то соответствующее значение магнитной жесткости Бустера должно составлять примерно 25 Тл\*м. При разумном периметре ускорителя такая рекордная для бустеров магнитная жесткость может быть достигнута при использовании магнитов со сверхпроводящей обмоткой.

Использование сверхпроводящей магнитной системы дополнительно приводит к модификации концепции получения сверхвысокого вакуума, необходимого для ускорения не полностью ободранных тяжелых ионов. Вакуумная камера магнитных элементов, имеющая температуру близкую к температуре жидкого гелия, обеспечивает эффективную криогенную откачку всех газов, кроме водорода. Требуемая скорость откачки по водороду может быть обеспечена за счет использования геттерных насосов.

При использовании однотипных магнитных систем длительности циклов изменения магнитного поля бустера и основного синхротрона сравнимы, и накопление пучка в основном синхротроне не приводит к увеличению среднего по времени потока ускоренных ядер. Поэтому накопление пучка, при его недостаточной интенсивности от источника, необходимо проводить при инжекции в бустер. Для этого в бустере требуется предусмотреть несколько альтернативных схем инжекции (для работы с разными типами источников), а канал транспортировки пучка из линейного ускорителя в бустер должен обеспечивать согласование пучка при любой из этих схем.

Для реализации некоторых методов многократно повторяемой инжекции необходимо охлаждение пучка, и при энергии инжекции единственное решение - это электронное охлаждение. Соответственно, оптическая структура Бустера выбиралась, в том числе, из условия удобства размещения системы электронного охлаждения, и такая система изначально была заложена в проект.

Модернизация и развитие Нуклотрона, кроме достижения его проектных параметров и подготовки к инжекции из Бустера и вывода пучка в коллайдер, в качестве дополнительной цели имела превращение этого ускорителя в установку для тестирования новых режимов работы магнитно-криостатной системы и новых технологий, которые планируется использовать в коллайдере. Например, была исследована работа магнитной системы в режиме циркуляции пучка на «столе» поля с длительностью до 15 минут, создан канал стохастического охлаждения пучков, на котором к настоящему времени впервые в РФ продемонстрировано охлаждение пучков тяжелых ионов, вплоть до ксенона.