

СВЕДЕНИЯ О ХОДЕ ВЫПОЛНЕНИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ПРОГРАММЫ

Этап 2022 года

Целью проекта является разработка новой концепции/й и связанной с ней элементной базы построения компактных импульсно-периодических ускорителей протонов и электронов. Проект включает решение как фундаментальных, так и прикладных-инженерных задач, интегрированных в организационную инфраструктуру проекта и направленных на решение единой научно-технической задачи. В рамках выполнения проекта будут отработаны новые типы нейтрон-генерирующих мишеней на основе бериллия, высокоинтенсивных линейных ускорителей протонов малой скважности, сильноточных инжекторов протонов на основе источника на электрон-циклотронном резонансе на рабочей частоте 28 МГц, мишеней на основе газовой-кластерных сред, ускорительных модулей для пучков электронов с импульсными терагерцовыми полями большой интенсивности, линейных ускорителей электронов.

Целью данной работы в рамках этапа №2 является проведение комплексных исследований существующих и перспективных технических решений для создания компактных источников нейтронов на основе ускорителя протонов, а также мишеней на основе газовой-кластерных сред, ускорительных модулей для пучков электронов с импульсными терагерцовыми полями большой интенсивности, линейных ускорителей электронов. .

Для достижения поставленной цели выполнены следующие работы:

- По пункту 2.1.1 План-графика (ПГ) разработаны технологии создания ускоряющих структур с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (так называемые RFQ) и структур с трубками дрейфа (так называемые DTL), работающих в режиме малой скважности путем последовательной пайки элементов данных ускоряющих структур в вакуумной печи. Представлено

описание процессов создания, а именно: последовательности изготовления и пайки элементов данных резонаторов.

- По пункту 2.1.2 ПГ разработана рабочая конструкторская документация на изготовление макетов резонаторов ускорителя, а именно: макет секции RFQ и макет резонатора DTL. Проведен поверочный расчет конструкции макетов, по результатам которого составлены таблицы как с геометрическими параметрами резонаторов, так и их электродинамическими характеристиками.
- По пункту 2.1.3 исследовательской программы(проекта): Разработан и изготовлен вакуумный узел компактного источника нейтронов, включающий в себя вращающуюся мишенную сборку и вакуумную камеру, смонтированные с применением магнитожидкостного уплотнения. На данном этапе разработана следующая документация: 1) Конструкторская документация в соответствии с ГОСТ 2.125-2008 на вакуумный узел мишени компактного нейтронного источника в составе: а. чертеж общего вида; б. габаритный чертеж; с. схема вакуумная; 2) Акт изготовления вакуумного узла мишени компактного нейтронного источника. Произведены испытания вакуумного узла мишени компактного нейтронного источника. В результате испытаний вакуумный узел мишени и его отдельные части показали свою вакуумную герметичность, а достигнутые в короткий срок показатели вакуума порядка 10^{-6} мбар показывают отличную вакуумную изоляцию всех частей итогового изделия. Дополнительное испытание прочности конструкции барабана мишенной сборки доказывает его пригодность для эксплуатации в условиях повышенного давления воды внутри и высокого вакуума снаружи. На данном этапе работ была разработана следующая документация: 1) Программа и методики проведения технических

испытаний; 2) Протоколы испытаний вакуумного узла мишени компактного нейтронного источника

- По пункту 2.1.4 ПГ изготовлен и испытан макет плазменной части ЭЦР протонного инжектора в составе: макет вакуумной системы, макет магнитной ловушки, макет системы охлаждения, макет системы формирования протонного пучка, макет системы высоковольтной изоляции ЭЦР инжектора. На данном этапе разработана следующая отчетная документация: - Акты изготовления макета плазменной части ЭЦР протонного инжектора, макета вакуумной системы, макета магнитной ловушки, макета системы охлаждения, макета системы формирования протонного пучка, макета системы высоковольтной изоляции ЭЦР инжектора; - Акты и протоколы испытаний макета плазменной части ЭЦР протонного инжектора, макета вакуумной системы, макета магнитной ловушки, макета системы охлаждения, макета системы формирования протонного пучка, макета системы высоковольтной изоляции ЭЦР инжектора; - Программа испытаний. Выполненные разработки и осуществление дальнейших исследований позволят реализовать макет протонного ЭЦР инжектора для компактного источника нейтронов. В качестве выводов и обобщений по выполненным на данном этапе работам и полученным результатам можно заключить следующее: изготовленный и испытанный макет плазменной части ЭЦР протонного инжектора позволит перейти к реализации задач третьего этапа проекта.
- По пункту 2.1.5 ПГ проведено численное моделирование нейтронных установок для компактного источника нейтронов. Проведено моделирование двух вариантов замедлителя нейтронов - биспектрального (вода+метан) и мульти спектрального на основе мезитилена. Для работы дифрактометра на полном спектре

длин волн от $1 \div 5 \text{ \AA}$ и наилучшем разрешении с расходимостью на образце 0.25° , частоте повторения нейтронного импульса длительностью 156 мкс в 40 Гц , получено что при использовании мезитилена плотность потока составляет $\Phi = 5.38 \times 10^3 \text{ н/(с*см}^2\text{)}$, при использовании параводорода $\Phi = 6.89 \cdot 10^3 \text{ н/(с*см}^2\text{)}$. Для работы на узком диапазоне длин волн - например, на полосе $1 \div 2 \text{ \AA}$ - нужно переключаться на тепловой замедлитель, то есть, на воду при температуре $T = 300^\circ\text{К}$. При этом изменится длительность нейтронного импульса – 62 мкс и частота его повторения – 161 Гц . За счет увеличения частоты повторения импульса в 4 раза увеличится плотность потока на образце, которая составит $\Phi = 1.33 \cdot 10^5 \text{ н/(с*см}^2\text{)}$. Полученные результаты будут использованы для выбора конкретного дифрактометра для установки DARIA. В рамках данного этапа по разработке криогенной камеры холодного замедлителя для КИН DARIA были достигнуты следующие результаты: - выполнены расчеты на статическую прочность, которые показали, что максимальное напряжение на стенке кожуха составляет $\sim 150 \text{ МПа}$. Указанное значение не превышает ожидаемых нагрузок, которые могут возникнуть при эксплуатации; - проведен комплекс теплофизических расчетов; изготовлен прототип ККЗ; подготовлена и апробирована инфраструктура для проведения дальнейших полномасштабных испытаний ККЗ.

- По пункту 2.1.6 ПГ в процессе выполнения этапа разработана конструкция и изготовлен Цилиндр Фарадея для высокоинтенсивного пучка МэВ-ных энергий. В процессе разработки были найдены, сформулированы и реализованы конструкторские решения, позволившие решить поставленную задачу. Выпущен комплект конструкторской документации на

Цилиндр Фарадея. Выпущен акт, подтверждающий успешное завершение изготовления Цилиндра.

- По пункту 2.1.7 ПГ проведены расчеты и анализ вариантов конфигурации нейтрон генерирующей мишени. В качестве наиболее оптимального выбран вариант мишени в виде вращающегося диска с инжекторным охлаждением внутренней поверхности. Разработана 3Д модель выбранной конфигурации нейтрон генерирующей мишени. Проведена оценка среднего времени жизни мишени. Представлены результаты расчета потоков нейтронов. Все выполненные работы и полученные результаты имеют непосредственное практическое отношение к разрабатываемому проекту DARIA.
- По пункту 2.1.8 ПГ в результате моделирования и оптимизации разработана концепция нейтронной системы компактного источника нейтронов с тремя нейтронными установками – нейтронным дифрактометром, нейтронным рефлектометром и установкой малоуглового рассеяния нейтронов. Для каждого инструмента определены оптимальные параметры покрытий стенок нейтронных труб, определены длины секций, радиусы кривизны, параметры пропускания НВС. Выполненные работы полностью соответствуют Плану-графику работ.
- По пункту 2.1.9 ПГ изготовлен прототип криогенного замедлителя, его вакуумной камеры, криогенной системы, инженерной инфраструктуры для обеспечения его работы. Прототип криогенного замедлителя изготовлен для исследования возможности его использования на компактном нейтронном генераторе DARIA. На основе анализа расчетных моделей методом Монте-Карло симулирования, был предложен Криогенный Замедлитель на основе мезитилена с оптимальным выходом холодных нейтронов. Для выбранной конфигурации был

спроектирован прототип камеры криогенного мезитиленового замедлителя (ККЗ), рассчитаны его внутренние напряжения и деформации в зависимости от условий эксплуатации, проведены теплофизические расчеты. В рамках выполнения работы была изготовлена камера криогенного замедлителя и подготовлена инфраструктура для испытаний ККЗ.

- По пункту 2.1.10 ПГ разработаны и оптимизированы электродинамические модели ускоряющих резонаторов и система СВЧ питания линейного ускорителя электронов на энергию 8-50 МэВ с инжекцией от электронного источника на основе кластерных плазменных систем. Предложено использовать две ускоряющих секции на основе бипериодической ускоряющей структуры. Первая секция (согласователь) обеспечивает захват сгустка в режим ускорения, в ней выполняется гимнастика сгустка для подготовки перезахвата и последующего ускорения во второй регулярной секции. Первая секция включает семь ускоряющих ячеек, две из которых обеспечивают захват и разворот сгустка в фазовом пространстве. Выходная энергия после первой секции составляет 8 МэВ. Регулярная секция состоит из 40 ускоряющих ячеек и обеспечивает дальнейшее ускорение пучка. Выходная энергия пучка может регулироваться в диапазоне от 20 до 53 МэВ при амплитуде напряженности ускоряющего поля от 100 до 400 кВ/см. Структуры настроены на рабочую частоту, оптимизированы по добротности и эффективному шунтовому сопротивлению, согласованы между собой. Разработана модель системы СВЧ питания двухсекционного ускорителя на основе клистрона «Исток» КИУ-54 мощностью до 25 МВт, что обеспечивает возможность получения пучка с энергией более 50 МэВ.

- По пункту 2.1.11 ПГ разработан, изготовлен и испытан прототип вакуумного компактного импульсно-периодического лазерно-плазменного источника электронов на основе газовой-кластерной струи. Предложены конструктивные решения и разработана конструкторская документация прототипа вакуумного компактного импульсно-периодического лазерно-плазменного источника электронов на основе газовой-кластерной струи. Проведено обоснование конструктивных решений прототипа ЛПИЭ. Проведены расчеты параметров оптических элементов для прототипа ЛПИЭ по формированию лазерноиндуцированной плазмы в газовой-кластерной струе. Проведены расчеты оптимальных параметров газовой-кластерной струи. На следующем этапе предполагается провести работы по исследованию характеристики и определению рабочих параметров прототипа компактного импульсно-периодического лазерно-плазменного источника электронов на основе газовой-кластерной струи.
- По пункту 2.1.12 ПГ разработана экспериментальная установка с использованием вакуумной камеры для исследования процесса генерации электронного пучка в слое с твердотельной и с пониженной плотностью и одновременной диагностической лазерно-плазменной генерации рентгеновских импульсов. Достигнута интенсивность лазерного излучения на мишени более $5 \cdot 10^{17}$ Вт/см². Получен достаточный для применений выход характеристического рентгеновского излучения 10^8 фотонов за импульс. Для эффективного ускорения электронов, при релятивистском параметре при $a_0 = 1$ и длине волны $\lambda = 0.8$ мкм минимально необходимое значение лазерной интенсивности составляет порядка $I \approx 10^{18}$ Вт/см². В данном случае энергия электрона близка к его энергии покоя. Разлёт электронов в таком случае составляет примерно ~ 0.5 радиан. Характерная величина

энергии ускоренных электронов при этом около 1 МэВ. Были проведены эксперименты по подготовке экспериментального узла для получения ускоренных электронов, образованных при взаимодействии лазерного излучения с мишенью медной и пониженной плотности с целью отработки методики характеристики электронов и интенсивности, в том числе и используя рентгеновское излучение. В вакуумных условиях исследованы энергия рентгеновского импульса и его спектр при $NA = 0.12$ фокусировке, энергии до 250 мДж, 30 фс параметрах для лазерного импульса на мишени. Определены достижимый при интенсивности $I=1.5 \cdot 10^{18}$ Вт/см² поток рентгеновского излучения $2 \cdot 10^8$ фотон/(стерадиан*сек)) с энергиями РИ фотонов тормозного излучения от 10 до 50 кэВ, поток характеристических фотонов составил при этом $3.8 \cdot 10^8$ фотон/(стерадиан*сек). Протестированы несколько толщин фольг (5-10-20-100 мкм) в качестве мишени для лазерно-плазменной генерации ускоренных частиц и для рентгеновского излучения. Отработана методика оптимизации лазерно-плазменной генерации в вакуумной камере при короткой острой $NA = 0.12$ фокусировке и мультитераваттной мощности. Настроены вакуумные моторы, их соединение через вакуум, для подстройки ориентации зеркала основного луча, для подстройки фокуса, для движения мишени. Отработаны методы защиты персонала от ионизирующих излучений, методы защиты оптики от разлёта продуктов абляции. Спроектированы схемы экспериментальных стендов для работы в вакуумных условиях с газовой-кластерной мишенью при дальнейшей работе по созданию пучков ускоренных частиц.

- По пункту 2.1.13 ПГ адаптирована технология создания ускоряющей структуры, предназначенной для ускорения электронов, сгенерированных источником на основе кластерной

плазмы, разработана «Временная технологическая инструкция по особым операциям изготовления ускоряющей структуры».

- По пункту 2.1.14 ПГ проведены испытания прототипа вакуумного компактного импульснопериодического лазерно-плазменного источника электронов на основе газовой кластерной струи. Результаты испытаний положительны, изделие рекомендовано для дальнейших применений. Изготовлен прототип компактного источника ускоряющего поля для электронного пучка на основе кристалла ниобата лития. Проведены испытания прототипа компактного источника ускоряющего поля для электронного пучка на основе кристалла ниобата лития. Результаты испытаний положительны, изделие рекомендовано для дальнейших применений.
- По пункту 2.1.15 ПГ разработан время-пролетный рефлектометр тепловых и холодных нейтронов для импульсного компактного источника нейтронов DARIA. Рефлектометр с двумя флипперами и с анализом поляризации после образца позволяет проводить эксперименты, в зависимости от решаемой физической задачи, в одной из двух мод: Мода I - время-пролетный режим с использованием «белого» неполяризованного пучка; Мода II - времяпролетный режим с использованием «белого» поляризованного пучка. Представлены основные параметры нейтронного рефлектометра планируемого для компактного источника нейтронов DARIA. Отмечена перспективность использования концепции проведения рефлектометрических измерений с помощью коротких нейтронных спектров совместно с импульсным источником нейтронов с возможностью изменения частоты следования нейтронных импульсов и их длительности. Использование элементов поляризационного анализа рефлектометра позволяет получить модули 4-х элементов

матрицы отражения нейтронов. Это дает возможность детального исследования магнитных тонкопленочных наноструктур. Предложена схема реализации метода МУРН в условиях компактного нейтронного источника. Показано, что метод может быть реализован на КИН со светосилой, достаточной для проведения измерений, обеспечивая приемлемый измерительный диапазон по переданному импульсу. Определены физические параметры узлов, обеспечивающих работу установки. Стоит отметить, что для МУРН впервые в России предлагается установка, использующая лишь часть спектра нейтронного излучения, однако именно это решение является ключевым для малоомощного источника, так как позволяет исключить время, затраченное детектором на регистрацию заведомо бесполезной части спектра в каждом конкретном эксперименте.

- По пункту 2.1.16 ПГ проведена оптимизация конструкции СВЧ систем ЭЦР протонного инжектора. На данном этапе разработана Методика управления параметрами СВЧ излучения для нагрева плазмы. Все работы, запланированные на данном этапе, выполнены в полном объеме и удовлетворяют условиям Соглашения и плана-графика. Результаты проведенных работ в рамках проекта превышают мировой уровень.
- По пункту 2.1.17 ПГ разработана методика исследования процесса формирования электронного пучка по параметрам сопутствующего терагерцового излучения. Обоснована необходимость контроля параметров по сопутствующему терагерцовому излучению. На следующем этапе предполагается провести работы по разработке ускорительной системы на основе генератора терагерцовых импульсов. Провести анализ и корректировку разработанных методик исследования процесса

формирования электронного пучка в газокластерной струе для ускорительной системы.

- По пункту 2.1.18 ПГ достигнуто компактное расположение элементов в вакуумной камере и снаружи неё. Канал регистрации видеоизображения с сцинтиллятора протестирован. Настроена плёнка Ланекс за медной мишенью для регистрации ускоренных электронов в направлении «вперёд, сквозь мишень». Собраны и установлены отклоняющие магниты для оценки энергий ускоренных электронов, проведены измерения по смещению электронов в поле магнитов. Настроена плёнка Ланекс за и перед медной мишенью для регистрации ускоренных электронов в направлении «вперёд, сквозь мишень» и «назад, отражение». Поставлены отклоняющие магниты, откалибровано смещение электронов. Подход и экспериментальный стенд для случая кластеров, описанный в отчете за 2022 год будет использоваться в работе над этапом 2023. Данная схема небольшими изменениями переделана в конфигурацию для твердотельной мишени, которая использовалась на этапе 2022 года. При этом только мишенный узел будет заменяться в камере-3, вместо газового сопла используются мишень на основе протягиваемой медной либо пластиковой лент, толщиной 10-100 мкм, шириной 20 мм, длиной 1-3 метра.
- По пункту 2.1.19 ПГ разработаны и реализованы схемные решения на предусилительную электронику Цилиндра Фарадея. Выпущен комплект принципиальных схем и схем электрических соединений, а также документации на печатные платы.
- По пункту 2.1.20 ПГ были произведены работ по модернизации экспериментальной базы научно-образовательного центра «Функциональные наноматериалы» (1 очередь).

- По пункту 2.2.1 ПГ проведены работы по устройству наливного токопроводящего пола в месте предполагаемой установки высоковольтного оборудования для компактного нейтронного генератора, закуплено оборудование для проведения расчетных работ в рамках Соглашения.
- По пункту 2.2.2 разработан проект Технического задания модернизации инженерных коммуникаций для размещения протонного ускорителя в ИФМ УрО РАН
- По пункту 2.2.3 ПГ выполнены работы второй очереди по развитию и модернизации экспериментальной базы НИЦ КИ - ККТЭФ для проведения исследований по проекту, а именно: закуплен инструмент для проведения монтажных работ, закуплено вакуумное оборудование и оборудования для линии высокого давления, обеспечивающие работу вакуумной системы для тестирования резонаторов RFQ и DTL, смонтированы въездные ворота в корпус, где будет размещаться компактный нейтронный генератор.
- По пункту 2.2.4 ПГ выполнены работы по ремонту внутренних водостоков помещения, предназначенного для размещения ускорителя протонов в ИФМ УрО РАН
- По пункту 2.3.1 ПГ Проведено обучение 20 человек по курсу дополнительного образования «Современные проблемы создания ускорителей заряженных частиц» и 20 человек по курсу «Численное моделирование нейтронных экспериментальных установок»
- По пункту 2.3.2 ПГ проведена IV-ой молодежной конференции «Проект DARIA: Компактные источники нейтронов в России» в которой приняло участие 39 человек

- По пункту 2.3.3 и 2.3.4 ПГ проведена модернизация двух учебных лабораторий в НИЯУ МИФИ - лаборатория "Вакуумная техника" и лаборатория "Электронные системы ускорителей"
- По пункту 2.3.5 ПГ проведена школа НИКОНС-2022, в которой приняло участие 49 человек.