УТВЕРЖДАЮ

Директор Института

/ / “ “ 2023 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОТКРЫТИЯ ПРОЕКТА

ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ

1. **Общие сведения о проекте**
   1. **Шифр темы** 3-5-1130-2017
   2. **Шифр проекта**
   3. **Лаборатория** ЛЯР
   4. **Научное направление**

Физика тяжёлых ионов

* 1. **Наименование проекта**

Лёгкие экзотические ядра вблизи границ ядерной стабильности

* 1. **Руководители проекта**

Каминьски Г., Cидорчук С.И.

* 1. **Заместители руководителя проекта**

Худоба В., Фомичев А.С.

1. **Научное обоснование и организационная структура**
   1. **Аннотация**

Вместе с развитием современной ускорительной и вычислительной техникой стало возможным вывести ядерную физику далеко за пределы области стабильности, как в теории, так и в практике. Ядерные системы, далекие от линии стабильности, по географической аналогии, называются экзотическими ядрами. Исследование экзотических ядер и несвязанных ядерных систем на границах ядерной стабильности стало возможным во многом благодаря развитию пучков радиоактивных ионов (РИ) на ускорительных установках. Для изучения радиоактивных частиц с коротким периодом полураспада, необходимо сначала получить их в лабораторных условиях. Эта область физики активно исследуется в ведущих мировых центрах (РИКЕН, ГСИ, ГАНИЛ, МГУ) [1]. В ЛЯР ОИЯИ программа исследований легких экзотических ядер методом фрагментации ”на лету” (in-flight) на сепараторе АКУЛИНА-1 [2] на циклотроне У-400М началась в 1996 г. В 2017 году экспериментальный комплекс ЛЯР был расширен путем ввода в эксплуатацию установки нового поколения — сепаратора АКУЛИНА-2. Это открыло широкий спектр новых экспериментальных возможностей для исследования легких экзотических ядер на вторичных пучках в диапазоне энергий 5-50 МэВ/нуклон.

Сепаратор АКУЛИНА-2 оснащен радиочастотным фильтром (ВЧ-фильтром) для дополнительной очистки вторичных пучков, магнитным спектрометром для разделения продуктов реакции, массивом нейтронных детекторов на основе кристаллов стильбена, а также системами регистрации заряженных частиц. Эксперименты, проведенные на новом сепараторе, уже привели к получению новых данных о чрезвычайно нейтронно-избыточных ядерных системах, таких как 6,7H, 7,9He, 10Li [3-6]. Реализация экспериментальной программы была остановлена в 2020 году из-за модернизации циклотрона У-400М. К 2024 году модернизация циклотрона должна быть завершена. В дальнейшем модернизированный циклотронный комплекс будет предлагать интенсивные пучки тяжелых ионов для изучения легких экзотических ядер на качественно новом уровне.

Программа исследований направлена на изучение структуры легких ядер и ядерных систем вблизи и за границами ядерной стабильности с помощью реакций передачи, а также на исследование редких каналов распада и влияние механизмов реакций на наблюдаемые характеристики изучаемых ядер. Применение реакций передач в изучении структуры изотопов вблизи границ ядерной стабильности способствует получению наиболее достоверных сведений и проверке существующей информации.

Экспериментальная программа будет реализована на установке АКУЛИНА-2 с использованием ряда преимуществ - работа с интенсивными пучками, новым ключевым оборудованием сепаратора (ВЧ- фильтр, спектрометр нулевого градуса) и комплекса криогенных мишеней [7]. Установка АКУЛИНА-1 будет применяться для проведения тестовых измерений, тестирования детекторов и прикладных исследований (облучение образцов и т.п.), не требующих высокого качества вторичного пучка (интенсивность, очистка от примесей, поперечный размер).

* 1. **Научное обоснование (**цель, актуальность и научная новизна, методы и подходы, методики, ожидаемые результаты, риски)

**Область интересов – легкие экзотические ядра на границах ядерной стабильности.**

Продвижение к границам ядерной стабильности в изучении нейтронно-избыточных и нейтронно-дефицитных ядер было и остается главным приоритетом ядерной физики за последние полвека. Изучение свойств этих ядер имеет решающее значение для понимания природы ядерных сил, астрофизических процессов и образования ядер химических элементов.

Текущее состояние исследований легких экзотических ядер в области *Z* ≤ 20 схематично показано на рис. 1. Граница ядерной стабильности была достигнута только в отношении наиболее легких ядер (5,6,7H, 9,10He, 11,13Li, 16,18Be, 17,19B и др.), свойства которых интенсивно изучаются в ведущих мировых центрах [1]. Среди наиболее интересных объектов исследования необходимо упомянуть так называемые боромиевские ядра с двухнуклонным гало, двухпротонной радиоактивностью, кластерной структурой и трехчастичным распадом [8]. Как известно, модели структуры ядра были сформулированы на основе данных, полученных для ядер вблизи линии *β*-стабильности. Предсказательная сила этих моделей резко снижается при переходе в неизвестную область ядерной карты. Поэтому одним из особых интересов изучения экзотических ядер с низкой энергией связи валентных нуклонов и аномальным отношением *N/Z* является получение новых данных для углубленного зондирования структуры ядра.

Для проведения экспериментов с экзотическими ядрами требуются вторичные пучки высокой энергии и высокой интенсивности. Но очень высокая энергия, в свою очередь, накладывает ограничения на механизм реакции. С ростом энергии сечения для передачи нуклона падают, а для выбивания соответственно увеличиваются. В результате, экспериментальная информация о ядерной структуре и каналах распада легчайших ядер весьма скудна и противоречива, так как имеющиеся данные собраны для разных механизмов реакций, конкурирующих в широком диапазоне энергий.

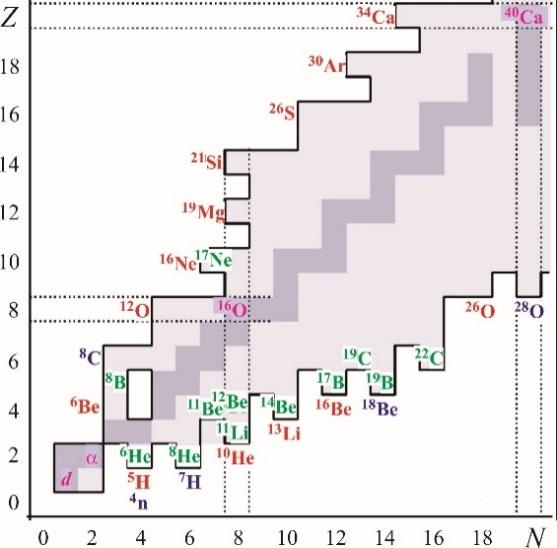


Рисунок 1. Состояние исследований легких ядер для Z ≤ 20. Зелёным цветом выделены ядра с гало структурой, красным – излучатели двух протонов или нейтронов, синим – 4n/4p излучатели, серым и светло серым цветом выделены долина стабильности и области ядерной стабильности, пунктиром обозначены замкнутые оболочки по нейтронам/протонам.

Одним из основных источников информации о структуре экзотических ядер являются эксперименты по измерению фрагментации или выбивания при сравнительно больших энергиях. Эти данные зачастую противоречат результатам, полученным из реакций передачи (например, 5Н или 10Не). Одно из возможных объяснений заключается во влиянии структуры входного состояния и механизма реакции на формирование спектра конечного состояния. Последовательное применение реакций передач одного/двух нуклонов для изучения структуры ядер вблизи границ ядерной стабильности может привести к получению наиболее достоверной информации и пересмотру имеющихся знаний. Кроме того, необходимо сосредоточиться на полном кинематическом эксперименте, чтобы получить наиболее достоверную информацию о структуре ядра. Также важно, что диапазон энергий тяжелых ионов на ускорителе У-400М оптимален для изучения реакций прямых передач, которые в свою очередь, являются наиболее надежным источником информации о структуре ядра.

Наличие криогенных мишеней из изотопов водорода и гелия дает возможность перейти к более экзотическим нейтронно-избыточным ядрам путем передачи одного и двух нуклонов в реакциях (*d,p*), (*d,n*), (*d*,3He), (*d*,3H), (*p,d*), (*p,t*), (3He,*n*), (*t,p*), (*t,α*), которые характеризуются относительно высоким сечением при энергиях 10–50 МэВ/нуклон [1].

В ЛЯР реакции передачи в доступном диапазоне энергий также перспективны для изучения структур кластеризации в легких экзотических ядрах. В качестве важного инструмента для этой цели рассматриваются измерения передачи альфа-частиц в реакциях (6Li,*d*). Реакции в обратной кинематике с регистрацией углового распределения заряженных продуктов распада возбужденных состояний исследуемого ядра могут быть использованы для определения спинов и четностей состояний альфа-кластеров. Измерение кластерной структуры в 14С в диапазоне энергий возбуждения 12–20 МэВ является одним из первых запланированных экспериментов.

**Экспериментальная база в ЛЯР**

В ЛЯР ОИЯИ программа исследований легких экзотических ядер, получаемых методом фрагментации ”на лету” (in-flight), началась в 1996 году на фрагмент-сепараторе АКУЛИНА-1 при ускорителе тяжелых ионов У-400M. Эта программа была ограничена узким диапазоном доступных первичных пучков, простой конструкцией сепаратора и соответствующими техническими параметрами (акцептанс, степень очистки, протяженность времяпролетной базы). Однако на этой установке вплоть до 2016 г., стабильно получались научные результаты благодаря следующим ключевым факторам: а) наличие высокоинтенсивных первичных пучков тяжелых ионов на циклотроне У-400М; (б) использование новых методов анализа корреляционных данных; в) применение криогенной тритиевой мишени для исследования целого ряда ядер 5H, 8He, 10He в реакции (*t,p*).

Далее, в 2018 г. вступил в строй новый фрагмент-сепаратор АКУЛИНА-2 [4] (рис.2), а в 2019-2020 гг. на нем были получены первые экспериментальные результаты [3,9,10]. В частности, удалось пролить свет на давние проблемы экспериментальной ядерной физики – обнаружение изотопов 6Н и 7Н, а также продвинуться в изучении нового режима спонтанного ядерного распада с одновременным испусканием 4*n*. По «производительности» радиоактивных пучков АКУЛИНА-2 превосходит установку АКУЛИНА-1 примерно в 30 раз, а улучшение степени очистки пучка может достигать фактора 100. Характеристики АКУЛИНА-2 в целом сопоставимы с установками того же класса, такие как RIPS (RIKEN, Япония) и LISE (GANIL, Франция).

A picture containing screenshot, text, LEGO, scale model

Description automatically generated

Рисунок 2. Сепараторы АКУЛИНА-1 и АКУЛИНА-2 в зале циклотрона У-400М. На выносках указаны основные подсистемы АКУЛИНА-2, требующие запуска/отладки с целью повышения светимости экспериментов с радиоактивными пучками и расширения их диапазона.

Подробная информация о состоянии установки АКУЛИНА-2 и возможная программа первых экспериментов с пучками РИ приведены в обзоре [9]. Основными преимуществами ускорительного комплекса АКУЛИНА-2 по сравнению с мировыми аналогами «in-flight» сепараторов являются: а) относительно низкий диапазон энергий ионов (от 5 – 7 МэВ/нуклон до 50 МэВ/нуклон); б) возможность работы в качестве физической мишени со всеми изотопами гелия и водорода (включая тритий), при этом толщина мишени может варьироваться в широких пределах (от 1019 до 1021 атом/см2), посредством выбора фазового состояния вещества - газообразное или жидкое. Кроме того, энергетический диапазон РИ оптимален для исследования прямых реакций передачи, что в свою очередь могло бы способствовать получению наиболее достоверной информации о ядерной структуре.

В период 2024-2028 гг. предлагается реализовать этот проект на новом модернизированном циклотронном экспериментальном комплексе У-400М. Исследования структуры ядер с большим избытком протонов или нейтронов и редких каналов их распада будут проводиться на вторичных пучках радиоактивных ионов, полученных в реакциях фрагментации пучков стабильных ядер с Z ≤ 36, ускоренных до энергии 30-60 МэВ/нуклон. Производящая бериллиевая мишень и имеющаяся радиационная защита позволят работать с мощностью пучка тяжелых ионов до 4 кВт. С середины 2020 года ведется модернизация ускорителя У-400М, направленная на повышение стабильности работы ускорителя, повышение энергии, интенсивности и качества пучков тяжелых ионов. С 2024 года, благодаря наличию пучков радиоактивных ионов нового качества, ожидается возобновление программы исследований с пучками РИ на качественно новом уровне.

**Программа исследований границ нуклонной стабильности**

Научная программа направлена на изучение свойств изотопов на границах стабильности. Ее можно разделить на несколько основных тем. Предлагается следующее подразделение:

1. Исследование свойств труднодоступных нейтронно-избыточных ядер, а также их зеркальных ядер или изобарических аналогов, которое является одним из основных направлений экспериментальной программы и играет важную роль в изучении свойств атомных ядер и проверки ядерных моделей. Сопоставление свойств изобарических аналогов позволяет продвинуться в понимании свойств ядерных сил и взаимодействий, лежащих в основе и определяющих поведение атомного ядра. Они также играют важную роль в астрофизике, поскольку информацию о зеркальных ядрах можно использовать для изучения нуклеосинтеза легких элементов в звездах.
2. **5He-5H**: в этой теме важным является преимущество использования одной и той же комбинации пучок + мишень для проведения экспериментов с реакциями 6He(*d*,3He)5H и 6He(*d*,3H)5He в условиях обратной кинематики. Распад обоих изотопов характеризуется испусканием двух нейтронов, что важно для понимания нейтрон-нейтронного взаимодействия в таких системах. Изучение поведения корреляций *t+n+n* и 3He*+n+n* имеет большое значение для понимания структуры 5H и динамики распада с испусканием двух нейтронов. Как и 5H, 5He также проявляет свойства двухнейтронного распада, который в данном случае соответствует каналу 3He*+n+n*. Изучение поведения этой моды распада может пролить свет на структуру 5He и нейтронного взаимодействия в нейтронно-избыточных ядрах.
3. **7H-7He-7B**: Все эти изотопы, несомненно, представляют большой интерес. Доступность комбинации пучков и мишеней дает возможность заселять низколежащие состояния в различных реакциях и исследовать их влияние на структуру этих состояний. Такие нейтронно-избыточные изотопы, как 7H и 7He, могут быть заселены на пучках ядер 6He и 8He, в столкновениях с протонной, дейтериевой или тритиевой мишенями, в таких реакциях, как 8He(*p,d*)7He, 6He(*d,p*)7He, 8He(*d*,3H)7He, 8He(*d*,3He)7H и 8He(*t*,4He)7H в обратной кинематике. Низколежащие состояния 7B могут быть заселены в результате реакции передачи нейтрона 8B(*p,d*)7B или реакции перезарядки 7Ве(*p,n*)7B. Исследование ядра 7B, зеркального ядру 7He, откроет новые экспериментальные возможности для изучения свойств 7He.

Эти экспериментальные подходы не только способствуют нашему пониманию свойств и структуры нейтронно-избыточных изотопов, но также помогают усовершенствовать теоретические модели, используемые для описания ядерных систем. Тщательно выбирая соответствующие комбинации пучков и мишеней, можно исследовать поведение этих изотопов в различных механизмах реакций, получая ценную информацию о фундаментальных силах, ответственных за ядерные взаимодействия, и о пределах ядерной стабильности.

1. **10He-10Li-10N**: Эти изотопы – одни из наиболее труднодоступных изобаров с массовым числом A=10, которые могут быть заселены в реакциях 8He(*t,p*)10He, 9Li(*d,p*)10Li и 9C(*d,n*)10N. Использование жидкой тритиевой мишени позволяет увеличить статистику 10He, что разрешит более детально исследовать его свойства и моды распада. Измерения характеристик всех продуктов реакций обоих зеркальных ядер 10Li и 10N облегчит проведение сравнительного анализа свойств их ядерных структур, который, в свою очередь, предоставит ценную информацию о природе поведения и взаимодействия этих экзотических изотопов и поможет дополнить теоретические модели, описывающие свойства и механизмы распада изотопов.
2. Первые эксперименты с тритиевой мишенью: 13Li; 16Ве;

В рамках проекта планируется провести несколько экспериментов из вышеперечисленного списка, с ориентировочной частотой один-два эксперимента в год. Конкретные эксперименты, которые необходимо провести, будут определяться готовностью нашего оборудования (см. Риски).

**Структура изотопов на границе стабильности в реакциях (*d,p*) и (*d,n*)**

Однонуклонные реакции передачи в течение многих десятилетий играли важную роль в формировании нашего понимания о структуре ядра. Такие реакции, как (*d,p*), рассматривались в качестве основного метода исследования свойств одночастичных состояний ядер Периодической таблицы. Кинематическая селективность и высокое сечение трансфера одного нейтрона (при малых углах, близких к 0) в реакции (*d,p*), в частности сделали эту реакцию одной из самых часто применяемых для идентификации спин-четности, а также изучения волновых функций одночастичных состояний ядер. Интерес к таким прямым реакциям передачи, как (*d,p*), возобновился и подкрепился возможностью проверить новые теоретические методы для расчета характеристик ядерных структур и поставить ряд новых вопросов, представляющих интерес для ядерной астрофизики. Такой подход особенно важен для уточнения информации по ядерным системам при изобилии противоречащих данных. Кандидатами для таких исследований являются 7,9He,10Li.

С этой целью будет проведено детальное исследование спектра низколежащих уровней 7,9He,10Li, заселяемых в реакциях (*d, p*), с использованием спектрометра нулевого угла и модернизированного нейтронного детектора. Основные преимущества новых измерений по сравнению с первыми измерениями на АКУЛИНА-2:

● ожидается повышенная статистика из-за более высокой интенсивности первичного пучка,

● лучшее энергетическое разрешение и значительное подавление фона за счет использования магнитного спектрометра нулевого угла.

**Ядерная структура с тритиевой мишенью**

Доступность криогенной тритиевой мишени дает уникальную возможность исследовать ядерные системы на границе стабильности и за ее пределами с криогенной мишенью T2 в реакциях передачи двух нейтронов. 3H является эффективным источником для трансфера 2*n* и легких ядер отдачи как *p*, для эффективной регистрации легких ядер (Z≤6) в диапазоне малых углов в системе центра масс (характеризуемой большим поперечным сечением) в корреляционных измерениях. При таком подходе можно было бы исследовать структуру группы легких ядер с нейтронным избытком. Кроме того, тритий может быть использован в качестве приемника протона в реакции (*t*, 4He), которая характеризуется большими сечениями. Использование 3H в качестве мишени, является эффективным способом (относительно большие сечения) изучения низколежащих резонансных состояний в 7H, 10He, 13Li и 16Be.

**7Н:** Спектры уровней 7H и каналы распада с последовательным и демократическим испусканием 4*n*, полученные в перекрестной реакции 8Hе(26 МэВ/А)+3H4Hе+7H для уточнения данных [3,4]. Преимущества по сравнению с имеющимися литературными данными: 1) заселение 7Н в такой реакции, характеризующейся более выгодным балансом энергии в сравнении с реакцией 8Hе+2H3Hе+7H; 2) ожидается более высокое энергетическое разрешение (улучшение в 2 раза по сравнения с опытом [4]) за счет регистрации всех продуктов в выходном канале. Спектры уровней 7H будут исследованы в реакции передачи (*t, α*) впервые.

**10He:** Исследование спектров уровней 10He и канала 2*n*-распада в реакции 8Hе(26 МэВ/А)+3H1H+10He для уточнения данных из [11]. Преимущества: 1) более высокая статистика за счет использования жидкой тритиевой мишени толщиной ~3\*1021 атом/см2, что в 3-5 раз толще, чем раньше) и высокой интенсивности 8He ~2\*105 1/с (ранее ~104 1/с); 2) более высокое энергетическое разрешение за счет полных кинематических измерений, т.е. корреляционные данные будут получены по тройным и четверным совпадениям *p*-8He-*n-n*.

**13Li:** Исследование низколежащих уровней в спектре 13Li в реакции 11Li(26 МэВ/А)+3H1H+13Li. Преимущества по сравнению с известными литературными данными: 1) заселение 13Li в реакции (*t, p*) с известным (т.е. хорошо изученным) механизмом передачи двух нейтронов будет осуществлено впервые; 2) за счет регистрации *p-n-*11Li и *p-n-n-*11Li совпадений со статистикой около 100 событий для основного состояния ожидается высокое энергетическое разрешение.

**16Be:** Измерение прецизионных данных по спектру низколежащих уровней 16Be и каналов распада с испусканием 2*n* будет проводиться с использованием реакции 14Be(*t, p*)16Be в обратной кинематике. Будет проведено сравнение с результатами работы [12], где 16Be заселялся в реакции отрыва протона 17B(53 МэВ/А) на бериллиевой мишени. Следует отметить, что исключается вклад (влияние) начальных состояний снаряда 17B на конечные состояния 16Be.

Более легкие нейтронно-избыточные изотопы, такие как 6,8Не, 11Li, 11-14Be, также находятся в зоне интереса.

**Экзотические виды распада. Поиск двухпротонной радиоактивности**

Введение в эксплуатацию ВЧ-фильтра откроет путь для проведения серии экспериментов протонно-избыточных ядер с Z≤36, лежащих вблизи и за пределами границы протонной стабильности. В их число входят ядра, которые, согласно предсказаниям, претерпевают двухпротонный распад. Более того, значительный интерес вызывает динамика 2*p*-распада резонансных состояний таких изотопов, как 6Be, 12O, 16Ne, 26S, 30Ar, и др. Тем не менее, лишь у немногих из них период полураспада, достаточный для обнаружения с помощью ToF метода. Нестабильное ядро 26S, которое, как ожидается, будет распадаться с испусканием двух протонов (2*p*), уже было изучено теоретически и исследовано экспериментально на АКУЛИНА-1 [13]. В этих исследованиях был установлен верхний предел периода полураспада для 26S T1/2 < 79 нс.

Изучение моды 2*p*-распада изотопов 17Ne и 26S представляется возможным в реакциях передачи (*p,d*), (3He,n) и перезарядки (*p,n*) под действием радиоактивных пучков и будет включено в программу исследований.

**26S:** Исследование низколежащих состояний 26S и поиск канала распада с испусканием двух протонов из основного состояния ядра 26S в реакциях 27S(30 МэВ/А)+1H2H+26S, 24Si(32 МэВ/А)+3Hе*n*+26S, 26P(28 МэВ/А)+1H*n*+26S. Преимущества по сравнению с известными литературными данными и данными полученными на АКУЛИНА-2 [13]: 1) предложенный подход к изучению 26S ранее не применялся; 2) Работа ВЧ-фильтра значительно улучшит чистоту желаемого вторичного пучка 27S/26P/24Si примерно в 50 раз по сравнению с АКУЛИНА-1. 3) будет улучшена система трассировки пучка до физической мишени за счет координатных детекторов низкого давления; 4) однозначное определение выходного канала (т.е. ядро 24Si из распада 26S24Si+*p+p* будет выделено на фоне коктейля падающего пучка) за счет использования магнитного спектрометра нулевой угла. Уточнение данных из [13].

**17Nе:** Изучение спектров уровней 17Ne и поиск канала 2*p*-распада первого возбужденного состояния 17Ne (3/2¯), уточнение данных работы [14], а именно, существенное (примерно в 50 раз) понижение предела отношения парциальных ширин 2p/ для первого возбуждённого состояния 17Ne (J=3/2¯), полученного в [14], где 2p/ < 1.6(3)х10-4. Эти данные играют важную роль для астрофизики, в частности, для теоретического описания горения в звездах. Перспективные реакции: 18Ne(35 МэВ/А)+1H2H+17Ne, 15O(38 МэВ/А)+3He*n*+17Ne, 17F(35 МэВ/А)+1H*n*+17Ne. Преимущества: 1) значительное (фактор 25) улучшение качества очистки пучка на АКУЛИНЕ-2 с ВЧ-фильтром по сравнению с АКУЛИНА-1 для настроек на 18Ne/17F/15O из производящей реакции 20Ne(53 МэВ/А)+Be; 2) улучшенный трекинг пучка на физическую мишень за счет применения координатных детекторов низкого давления; 3) понижение фона от снаряда-подобных продуктов за счет использования магнитного спектрометра нулевого градуса.

**Методология**

Предлагаемый проект исследования легких экзотических ядер требует работы на газовых и жидких мишенях при криогенных температурах, работы с более высокой степенью очистки пучков радиоактивных ионов, ввода в эксплуатацию и внедрения в экспериментальную базу необходимого оборудования и новых детекторных систем.

В настоящее время большая часть экспериментальных инструментов находится в рабочем состоянии; однако некоторые аспекты требуют дополнительной доработки и развития. Следующие элементы системы могут быть улучшены или реализованы с целью повышения эффективности исследований и расширения возможностей:

1. Изготовление и ввод в эксплуатацию тритиевой мишени.
2. Разработка и внедрение ячеек криогенных мишеней 1,2H и 3,4He.
3. Ввод в эксплуатацию ВЧ-фильтра для повышения степени очистки радиоактивных пучков, а также эффективности регистрации РИ.
4. Разработка и создание спектрометра нулевого градуса на базе существующего магнита D3 для измерения энергий и угловых распределений тяжелых продуктов реакции.
5. Система диагностики пучков радиоактивных ионов с использованием детекторов PPAC.
6. Массив детекторов нейтронов на основе пластиковых сцинтилляторов для регистрации нейтронов, испускаемых в результате ядерного взаимодействия в (*d,n*) - реакции.
7. Кремниевые стриповые детекторы для измерения координат и энергий заряженных частиц.
8. Кремниевые микростриповые детекторы, обеспечивающие высокое пространственное разрешение и большую площадь регистрации.
9. Программное обеспечение для проведения экспериментов и анализа данных (например, ExpertRoot, Go4 и др.), позволяющее обрабатывать и интерпретировать полученные результаты.

Внедрение и оптимизация указанной аппаратуры и инструментов значительно повысит эффективность исследований и расширит возможности изучения свойств экзотических ядер.

**Тритиевая мишень**

Для проведения экспериментов с радиоактивными пучками на сепараторе АКУЛИНА-2 создан комплекс криогенных физических мишеней с изотопами H2, D2, T2, 3He, 4He в газовой, жидкой и твердой (для водорода) фазах (рис. 3) [15]. Проект, разработанный совместно с ВНИИЭФ (Саров), ДЖМ (Дзержинск) и ВНИПИЭТ (Сосновый Бор), находится на завершающей стадии реализации. Эскизный проект комплекса тритий-мишень представлен на (рис. 3).

A picture containing text, diagram, plan

Description automatically generated

Рисунок 3. Комплекс криогенных физических мишеней. Схема газовакуумной системы (слева) и ячейки тритиевой мишени с соответствующими подсистемами (справа).

Он включает комплексную газовакуумную (включая газ тритий) систему безопасности подачи, охлаждения-нагрева, управления, радиационной безопасности и утилизации нежелательных газов. Комплекс обеспечит работу по газообразным и жидким мишеням при криогенных температурах.

Проект криогенной тритиевой ячейки-мишени, газовакуумной системы находится на стадии заказа и изготовления оборудования. Технический проект системы специальной вентиляции экспериментальной кабины проходит техническую экспертизу по правилам безопасности на стадии согласования. Проект системы утилизации жидких радиоактивных отходов проходит техническую экспертизу на выполнение правил безопасности. Мишени из всех долгоживущих изотопов водорода (включая тритий) и гелия толщиной в широком диапазоне (1020÷5\*1021 атом/см2) будут доступны для использования в экспериментах с 2026 года. Активность трития достигнет до 2,7 кКи. Самый рискованный этап этого проекта – невозможность/задержка получения сертификата на работу с тритиевым мишенным комплексом.

**ВЧ-фильтр**

В 2018-2020 гг., в продолжение разработки основного экспериментального оборудования для пучка АКУЛИНА-2, был разработан и установлен радиочастотный фильтр (ВЧ-фильтр) [1]. В 2024 году планируется ввод в эксплуатацию системы ВЧ-фильтра. Работа с РФ-фильтром откроет новые возможности исследований в протонно-избыточной области нестабильных ядер. Модернизированная линия пучка АКУЛИНА-2 позволит снизить нежелательные ионы при настройках на пучки РИ 27S/26P/24Si примерно в 50 раз по сравнению с аналогичными настройками на АКУЛИНА-1 [13]. Должна быть разработана система управления ВЧ-фильтром.

**Спектрометр частиц под передними углами**

В 2017 году на канале АКУЛИНА-2 был установлен дипольный магнит - главный элемент спектрометра частиц, вылетающих в узком переднем конусе. В период 2024-2028 гг. планируется дальнейшее развитие системы слежения за частицами на основе многопроволочных пропорциональных камер (МППК), плоскопараллельных лавинных счетчиков (ППЛС) (фронтальный детектор), годоскопа частиц (задний детектор) и пластиковых сцинтилляторов. Система слежения за частицами обеспечит реконструкцию траекторий заряженных частиц с хорошим позиционным разрешением и высокой эффективностью обнаружения. Кроме того, планируется использование системы слежения за частицами для диагностики пучков РИ и ионно-оптической настройки. Измерение траектории частиц с определением *Bρ* с высоким разрешением имеет решающее значение для достижения способности однозначной идентификации частиц по импульсу на сепараторе АКУЛИНА-2.

**Детекторы**

Также были разработаны новые детекторные системы и соответствующая электроника. В его состав входят: а) массив детекторов для регистрации нейтронов на основе кристаллов стильбена и пластиковых сцинтилляторов [16]; б) радиационно-стойкие и быстродействующие кремниевые стриповые детекторы, обеспечивающие отличное временное разрешение (σ ~ 50 пс) для диагностики РИ [17]; в) сцинтилляционные матрицы кристаллов CsI(Tl), LaBr3(Ce) и др. для регистрации гамма-квантов и возможной регистрации заряженных частиц; г) новое поколение микростриповых кремниевых детекторов, предназначенных для трассировки и мониторирования заряженных частиц [17]. Уже начато строительство систем трассировки частиц для спектрометра нулевого угла вместе с детекторами годоскопа и новый нейтронный массив в конечной фокальной плоскости F5.

Планируется модификация детекторных телескопов, предназначенных для исследования ядер, распадающихся с испусканием многих нейтронов. Модификация предполагает использование сборки из 100 сцинтилляторов ВС-404, находящихся в распоряжении группы АКУЛИНА. Предлагаемая детекторная система вместе с существующим массивом детекторов на основе стильбена [18] значительно повысит светимость установки АКУЛИНА-2, играющей ключевую роль в экспериментах с радиоактивными пучками [1,5].

**Риски:**

При анализе рисков для этого проекта мы выделяем две основные категории рисков, которые потенциально могут повлиять на сроки и успешность реализации проекта. Первая категория относится к запланированному строительству и вводу в эксплуатацию оборудования, когда могут возникнуть непредвиденные проблемы, задержки или технические трудности, влияющие на ход проекта. Вторая категория связана с внешними обстоятельствами, включая такие факторы, как возможность приобретения детекторов, электроники и вакуумной техники, а также возможные проблемы с сертификацией тритиевой мишени. Эти внешние факторы могут внести неопределенность и сложность, которые, в свою очередь, могут повлиять на выполнение и результаты проекта. Выявляя и устраняя эти риски на ранней стадии, мы стремимся смягчить их влияние на проект и обеспечить его успешное завершение.

В нашем анализе рисков мы рассматриваем потенциальные проблемы, связанные с ключевыми единицами оборудования, и предлагаем подходящие стратегии смягчения последствий:

1. Строительство и ввод в эксплуатацию тритиевой мишени сопряжены со средним уровнем риска, поскольку существует вероятность того, что сертификация, может быть не выдана. В таком случае возможным решением было бы проведение экспериментов, не требующих использования тритиевой мишени, тем самым обеспечив прогресс проекта, несмотря на эту потерю.
2. Разработка и внедрение криогенных мишеней 1,2H и 3,4He могут быть связаны с низким уровнем риска, в первую очередь из-за возможных задержек в строительстве. Чтобы устранить этот риск, команда проекта может использовать уже имеющиеся ячейки-мишени, что позволит продолжить эксперименты в соответствии с планом, пока разрабатываются новые ячейки-мишени.
3. Ввод в эксплуатацию ВЧ-фильтра для повышения чистоты радиоактивных пучков с высоким содержанием протонов представляет средний уровень риска. Потенциальные проблемы включают сложность создания радиационной защиты и получения сертификата для эксплуатации этого устройства. Чтобы снизить этот риск, проект рассматривает возможность проведения экспериментов с пучками нейтронов, что позволит продолжить исследования, пока идет сертификация ВЧ-фильтра.
4. Разработка и создание спектрометра нулевого градуса может столкнуться с потенциальными проблемами из-за отсутствия кремниевых стриповых детекторов в достаточном количестве и необходимого качества, что представляет средний уровень риска. Решением этой проблемы является покупка кремниевых стриповых детекторов, разработанных и произведенных на рынках, не затронутых санкциями.
5. Внедрение системы трассировки пучка диагностики радиоактивных ионов с использованием детекторов PPAC может столкнуться с потенциальными проблемами из-за нехватки высококвалифицированной рабочей силы, что представляет низкий уровень риска. В качестве решения проект может использовать существующую систему отслеживания на основе МППК, тем самым обеспечивая продвижение проекта.
6. Разработка стенки массива нейтронных детектора на основе пластиковых сцинтилляторов может столкнуться с потенциальными проблемами из-за отсутствия электроники в достаточном количестве для считывания всех сцинтилляционных модулей, что представляет средний уровень риска. Для снижения этого риска в рамках проекта может быть использована существующая нейтронная стена на основе монокристаллов стильбена в сочетании с имеющимися пластиковыми сцинтилляторами.
7. Кремниевые стриповые детекторы для измерения координат и энергий заряженных частиц могут столкнуться с потенциальными проблемами, так как эти детекторы являются расходными частями и ухудшают свои характеристики при облучении или повреждении во время манипуляций, что представляет высокий уровень риска. Решением этой проблемы является поиск новых поставщиков кремниевых детекторов с самого начала реализации проекта.
8. Микрострировые детекторы могут столкнуться с потенциальными проблемами, поскольку в настоящее время они доступны для ОИЯИ в рамках коллаборации SuperFRS Experiment Collaboration как часть NUSTAR в рамках FAIR. На данный момент детекторы не могут быть предоставлены для использования на территории, где расположен ОИЯИ, что представляет высокий уровень риска. Однако влияние на ход проекта минимально, и проект может продолжать работу с полосовыми (стриповыми) детекторами, обеспечивая результаты высокого качества.

Литература.

1. Л.В. Григоренко и др., Исследования легких экзотических ядер вблизи границы стабильности в ЛЯР ОИЯИ, УФН 186 (2016) 337–386 [L.V. Grigorenko et al., Phys. Usp. 59 (2016) 321–366].
2. A.M. Rodin et al., Status of ACCULINNA beam line, Nucl. Instrum. Methods. B204 (2003) 114-118.
3. A.A. Bezbakh et al., Evidence for the first excited state of 7H, Phys. Rev. Lett. 124 (2020) 022502.
4. I.A. Muzalevskii et al., Resonant states in 7H. Experimental studies of the 2H(8He,3He) reaction, Phys. Rev. C 103 (2021) 044313.
5. E.Yu. Nikolskii, et al., 6H states studied in the 2H(8He,4He) reaction and evidence of an extremely correlated character of the 5H ground state, Phys. Rev. C 105 (2022) 064605.
6. A.A. Bezbakh et al., Study of 10Li low energy spectrum in the 2H(9Li,p) reaction, Bull.of Russian Academy of Sciences: Physics, Vol. 84 (2020) 491.
7. M. Pfützner, M. Karny, L.V. Grigorenko, K. Riisager, Radioactive decays at limits of nuclear stability, Rev. Mod. Phys., 84 (2012) 567-619.
8. А.И. Базь, В.И. Гольданский, Я.Б. Зельдович, Систематика легчайших ядер, Успехи физических наук 85 №3 (1965) 445-483.
9. L.V. Grigorenko, I.G. Mukha, C. Scheidenberger and M.V. Zhukov, Two-neutron radioactivity and four-nucleon emission from exotic nuclei, Phys. Rev. C 84 (2011) 021303(R), pp.1-5.
10. A.S. Fomichev et al., The ACCULINNA-2 project: The physics case and technical challenges, Eur. Phys. J. A 54 (2018) 97.
11. S.I. Sidorchuk et al., Structure of 10He low-lying states uncovered by correlations, Phys. Rev. Lett. 108 (2012) 202502.
12. A. Spyrou et al., First observation of ground state dineutron decay: 16Be, Phys. Rev. Lett., 108 (2012) 102501.
13. A.S. Fomichev et al., Lifetime of 26S and a limit for its 2*p* decay energy, Int. Journal of Modern Phys. E 20 (2011) 1-18.
14. P.G. Sharov et al., Search for 2*p* decay of the first excited state of 17Ne, Phys. Rev C 96 (2017) 025807.
15. S.A. Krupko et al., “System of Cryogenic Physical Targets for the ACCULINNA-2 Facility”, JINR Publishing Department, P13-2022-48.
16. A.A. Bezbakh A. A. et al., A Neutron Spectrometer for Experiments with Radioactive Beams on the ACCULINNA-2 Fragment Separator, Instr. Exp. Tech. 2018. V. 61, No. 6. P. 631.
17. V. Eremin, et al., “A comparative study of silicon detector degradation under irradiation by heavy ions and relativistic protons”, Journal of Instrumentation, 13 (2018) 01019.
18. A.A. Bezbakh et al., “Detector array for the 7H nucleus multi-neutron decay study”, JINR Publishing Department, E13-2022-56.
    1. **Предполагаемый срок выполнения**

2024-2028 гг.

* 1. **Участвующие лаборатории ОИЯИ**

ЛЯР

2.4.1 Потребности в ресурсах МИВК

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Вычислительные ресурсы** | **Распределение по годам** | | | | |
| 1 год | 2 год | 3 год | 4 год | 5 год |
| Хранение данных (ТБ)   * EOS * Ленты |  |  |  |  |  |
| Tier 1 (ядро-час) |  |  |  |  |  |
| Tier 2 (ядро-час) |  |  |  |  |  |
| СК «Говорун» (ядро-час)   * CPU * GPU |  |  |  |  |  |
| Облака (CPU ядер) |  |  |  |  |  |

* 1. **Участвующие страны, научные и научно-образовательные организации**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Организация** | **Страна** | **Город** | **Участники** | **Тип соглашения** |
| **ВНИИЭФ** | Россия | Саров | А.А. Юхимчук + 4 чел. | договор |
| ВНИПИЭТ | Россия | Сосновый Бор | С.А. Несветайлов + 4чел. | договор |
| НИИЯФ МГУ | Россия | Москва | Д.О. Еременко + 2 чел. | протокол |
| ИЭ НАНБ | Беларусь | Минск | В.Г. Баев + 1 чел. | протокол |
| ФТИ НАНБ | Беларусь | Минск | В.И. Залесский + 1 чел. | протокол |
| IOP VAST | Вьетнам | Ханой | Ли Хонг Хим + 1 чел. | протокол |
| ХСМУС | Вьетнам | Ханой | В. Х. Хаи + 1 чел. | протокол |
| GSI-FAIR | Германия | Дармштадт | К. Шайденбергер + 3 чел. | протокол |
| ИЯФ | Казахстан | Алма-Ата | Н. Буртебаев + 3 чел. | протокол |
| PKU | Китай | Пекин | Й. Янлинь + 1 чел. | протокол |
| KU | Южная Корея | Седжонг | Х.К. Парк + 2 чел. | протокол |
| iThemba LABS | ЮАР | Сомерсет-Уэст | Р. Джонс + 2 чел. | протокол |
| UNISA | ЮАР | Претория | Л.М. Лекала + 2 чел. | протокол |

* 1. **Организации-соисполнители** *(те сотрудничающие организации/партнеры без финансового, инфраструктурного участия которых выполнение программы исследований невозможно. Пример — участие ОИЯИ в экспериментах LHC в CERN)*

1. **Кадровое обеспечение**
   1. **Кадровые потребности в течение первого года реализации**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **№№ п/п** | **Категория работника** | **Основной персонал, сумма FTE** | **Ассоциированный персонал, сумма FTE** |
| 1. | научные работники | 31 |  |
| 2. | инженеры | 13.25 |  |
| 3. | специалисты |  |  |
| 4. | служащие |  |  |
| 5. | рабочие |  |  |
|  | **Итого:** | **44.25** |  |

* 1. **Доступные кадровые ресурсы**
     1. **Основной персонал ОИЯИ**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **№№ п/п** | **Категория работников** | **ФИО** | **Подразделение** | **Должность** | **Сумма FTE** |
| 1. | научные работники | Пенионжкевич Юрий Эрастович | ЛЯР | Начальник сектора | 1 |
| 2. | научные работники | Безбах Андрей Анатольевич | ЛЯР | Начальник сектора | 1 |
| 3. | научные работники | Крупко Сергей Анатольевич | ЛЯР | Начальник группы | 1 |
| 4. | научные работники | Середа Юрий Михайлович | ЛЯР | Начальник группы | 1 |
| 5. | научные работники | Григоренко Леонид Валентинович | ЛЯР | Главный научный сотрудник | 1 |
| 6. | научные работники | Тер-Акопьян Гурген Мкртычевич | ЛЯР | Главный научный сотрудник | 0.5 |
| 7. | научные работники | Головков Михаил Сергеевич | ЛЯР | Ведущий научный сотрудник | 1 |
| 8. | научные работники | Никольский Евгений Юрьевич | ЛЯР | Ведущий научный сотрудник | 0.5 |
| 9. | научные работники | Вольски Роман | ЛЯР | Ведущий научный сотрудник | 0.5 |
| 10. | научные работники | Белогуров Сергей Геннадьевич | ЛЯР | Старший научный сотрудник | 1 |
| 11. | научные работники | Кононенко Геннадий Александрович | ЛЯР | Старший научный сотрудник | 1 |
| 12. | научные работники | Лукьянов Сергей Михайлович | ЛЯР | Старший научный сотрудник | 1 |
| 13. | научные работники | Маслов Владимир Анатольевич | ЛЯР | Старший научный сотрудник | 1 |
| 14. | научные работники | Парфенова Юлия Львовна | ЛЯР | Старший научный сотрудник | 1 |
| 15. | научные работники | Скобелев Николай Константинович | ЛЯР | Старший научный сотрудник | 1 |
| 16. | научные работники | Смирнов Владимир Иванович | ЛЯР | Старший научный сотрудник | 1 |
| 17. | научные работники | Соболев Юрий Геннадьевич | ЛЯР | Старший научный сотрудник | 1 |
| 18. | научные работники | Степанцов Сергей Викторович | ЛЯР | Старший научный сотрудник | 1 |
| 19. | научные работники | Тестов Дмитрий Александрович | ЛЯР | Старший научный сотрудник | 1 |
| 20. | научные работники | Ажибеков Айдос | ЛЯР | Научный сотрудник | 1 |
| 21. | научные работники | Горшков Александр Владимирович | ЛЯР | Научный сотрудник | 1 |
| 22. | научные работники | Князев Александр Геннадьевич | ЛЯР | Научный сотрудник | 1 |
| 23. | научные работники | Мауей Бакытбек | ЛЯР | Научный сотрудник | 1 |
| 24. | научные работники | Мендибаев Кайрат | ЛЯР | Научный сотрудник | 1 |
| 25. | научные работники | Шаров Павел Германович | ЛЯР | Научный сотрудник | 1 |
| 26. | научные работники | Amer Akhmed | ЛЯР | Младший научный сотрудник | 1 |
| 27. | научные работники | Батчулуун Эрдэмчимэг | ЛЯР | Младший научный сотрудник | 1 |
| 28. | научные работники | Исатаев Талгат | ЛЯР | Младший научный сотрудник | 1 |
| 29. | научные работники | Музалевский Иван Алексеевич | ЛЯР | Младший научный сотрудник | 1 |
| 30. | научные работники | Хирк Мишель | ЛЯР | Младший научный сотрудник | 1 |
| 31. | научные работники | Стукалов Сергей Сергееви | ЛЯР | Младший научный сотрудник | 1 |
| 32. | научные работники | Хамидуллин Булат Радикович | ЛЯР | Стажер-исследователь | 0.5 |
| 33. | инженеры | Горшков Владимир Александрович | ЛЯР | Ведущий инженер | 1 |
| 34. | инженеры | Слепнев Роман Станиславович | ЛЯР | Ведущий инженер | 1 |
| 35. | инженеры | Воронцов Андрей Николаевич | ЛЯР | Старший инженер | 1 |
| 36. | инженеры | Клыгин Сергей Александрович | ЛЯР | Старший инженер | 1 |
| 37. | инженеры | Азнабаев Даурен | ЛЯР | Инженер | 1 |
| 38. | инженеры | Бутусов Илья Васильевич | ЛЯР | Инженер | 1 |
| 39. | инженеры | Ертаева Динара | ЛЯР | Инженер | 1 |
| 40. | инженеры | Газеева Эльвира Михайловна | ЛЯР | Инженер | 1 |
| 41. | инженеры | Исмаилова Арайлым | ЛЯР | Инженер | 1 |
| 42. | инженеры | Май Куинь Ань | ЛЯР | Инженер | 1 |
| 43. | инженеры | Рымжанова Софья Алексеевна | ЛЯР | Инженер | 1 |
| 44. | инженеры | Шахов Алексей Викторович | ЛЯР | Инженер | 1 |
| 45. | инженеры | Алманбетова Енлик | ЛЯР | Лаборант | 1 |
| 46. | инженеры | Асемхан Кымбат | ЛЯР | Лаборант | 0.25 |
| 47. | инженеры | Молоторенко Ксения Дмитриевна | ЛЯР | Лаборант | 1 |
|  | **Total:** |  |  |  | **44.25** |

* + 1. **Ассоциированный персонал ОИЯИ**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **№№ п/п** | **Категория работников** | **Организация-партнер** | **Сумма FTE** |
| 1. | научные работники |  |  |
| 2. | инженеры |  |  |
| 3. | специалисты |  |  |
| 4. | рабочие |  |  |
|  | **Итого:** |  |  |

1. **Финансовое обеспечение**
   1. **Полная сметная стоимость проекта**

Прогноз полной сметной стоимости (указать суммарно за весь срок, за исключением ФЗП). Детализация приводится в отдельной форме.

* 1. **Внебюджетные источники финансирования**

Предполагаемое финансирование со стороны соисполнителей/заказчиков — общий объем.

Руководитель проекта /Каминьски Г./

Руководитель проекта /Сидорчук С.И/

Дата представления проекта в ДНОД

Дата решения НТС Лаборатории , номер документа

Год начала проекта

(для продлеваемых проектов) –– год начала работ по проекту

Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления Проекта

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования** | | | **Стоимость (тыс. долл.) потребности в ресурсах** | **Стоимость, распределение по годам** | | | | |
| 1  год | 2  год | 3  год | 4  год | 5  год |
|  | | Международное сотрудничество (МНТС) | 450 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 |
| Материалы | 1 700 | 300 | 320 | 340 | 370 | 370 |
| Оборудование и услуги сторонних организаций  (пуско-наладочные работы) | 420 | 100 | 80 | 80 | 80 | 80 |
| Пуско-наладочные работы | 80 | 30 | 30 | 20 | - | - |
| Услуги научно-  исследовательских организаций |  |  |  |  |  |  |
| Приобретение программного обеспечения | 175 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 |
| Проектирование/строительство | 50 | 20 | 20 | 10 | - | - |
| Сервисные расходы (*планируются в случае прямой принадлежности к проекту)* |  |  |  |  |  |  |
| **Необходимые ресурсы** | **Нормо-час** | Ресурсы |  |  |  |  |  |  |
| * сумма FTE, |  |  |  |  |  |  |
| * ускорителя/установки, |  |  |  |  |  |  |
| * реактора,….. |  |  |  |  |  |  |
| **Источники финансирования** | **Бюджетные средства** | Бюджет ОИЯИ *(статьи бюджета)* |  |  |  |  |  |  |
| **Внебюджет (доп. смета)** | Вклады соисполнителей  Средства по договорам с заказчиками  Другие источники финансирования | Ит.. 4 - 450  Ит. 5,6 – 2120  Ит. 9 – 80  Ит. 11 – 175  Ит. 18,19- 50 |  |  |  |  |  |

Руководитель проекта /Каминьски Г./

Руководитель проекта / Сидорчук С.И./

Экономист Лаборатории /Мамонова Т.В./

**ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА**

НАИМЕНОВАНИЕ ПРОЕКТА: ИССЛЕДОВАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ И СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ ПРОЕКТА

ШИФР ПРОЕКТА

ШИФР ТЕМЫ: 03-5-1130-2017

ФИО РУКОВОДИТЕЛЕЙ ПРОЕКТА: КАМИНЬСКИ ГЮ, СИДОРЧУК С.И.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  | |
| СОГЛАСОВАНО |  |  |  | |
| ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ИНСТИТУТА | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  ПОДПИСЬ | С.Н. Дмитриев | \_\_\_\_\_\_\_\_\_  ДАТА |  |
| ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ИНСТИТУТА | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  ПОДПИСЬ | С.Н. Неделько | \_\_\_\_\_\_\_\_  ДАТА |  |
| ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  ПОДПИСЬ | Б.Н. Гикал | \_\_\_\_\_\_\_\_\_  ДАТА |  |
| ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  ПОДПИСЬ | С.И. Сидорчук | \_\_\_\_\_\_\_\_\_  ДАТА |  |
| ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛАБОРАТОРИИ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  ПОДПИСЬ | И.В. Калагин | \_\_\_\_\_\_\_\_\_  ДАТА |  |
| УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ЛАБОРАТОРИИ  РУКОВОДИТЕЛЬ ТЕМЫ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  ПОДПИСЬ  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  ПОДПИСЬ | А.В. Карпов  С.И. Сидорчук | \_\_\_\_\_\_\_\_\_  ДАТА  \_\_\_\_\_\_\_\_\_  ДАТА |  |
| РУКОВОДИТЕЛИ ПРОЕКТА | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  ПОДПИСЬ | Г. Камински | \_\_\_\_\_\_\_\_\_  ДАТА |  |
| РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  ПОДПИСЬ | С.И. Сидорчук | \_\_\_\_\_\_\_\_\_  ДАТА |  |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| ОДОБРЕН ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  ПОДПИСЬ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_  ФИО | \_\_\_\_\_\_\_\_\_  ДАТА |