

УТВЕРЖДАЮ

Вице-директор ОИЯИ

“ _____ ” _____ 2019 г.

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОТКРЫТИЯ ТЕМЫ
для включения
В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН ОИЯИ НА 2020–2022гг.**

Шифр темы	Лаборатория	ЛНФ
	Отделы	НЭОНИКС, НЭОКС, ОЯФ, Установка ИБР- 2, Установка ИРЕН, МТО, ЭТО, КБ, ЦОЭП, группа ЯБ

Направление: «Физика конденсированных сред (04)»

Наименование темы: «Разработка концептуального проекта нового источника нейтронов ОИЯИ»

Руководитель темы

Швецов В.Н., Куликов С.А.

Краткая аннотация

Введение

Физика конденсированного состояния вещества с использованием ядерно-физических методов является одной из основных областей исследования Объединенного института ядерных исследований, что закреплено в Уставе ОИЯИ [1], последних «дорожных картах» и семилетних планах нашего Института, включая Семилетний план развития ОИЯИ на 2017–2023 гг., утвержденный Комитетом полномочных представителей правительств государств-членов ОИЯИ на сессии, состоявшейся 21–22 ноября 2016 г.

Массовое использование методов рассеяния нейтронов для исследования атомной и магнитной структуры твердых тел началось после окончания Второй мировой войны с использованием исследовательских ядерных реакторов. Уже в первых работах проявляются основные отличия нейтронных методов от рассеяния рентгеновских лучей, а именно –

чувствительность нейтронов к изотопному составу и магнитным свойствам исследуемых объектов [2,3]. Создание специализированных реакторов с выведенными пучками нейтронов берет начало в 1960х годах XX века. Так в США строительство высокопоточного пучкового реактора в BNL началось в 1961 году и в 1965 реактор вышел на критичность. Это был первый реактор с тяжеловодным замедлителем, в котором максимум плотности поток тепловых нейтронов достигался на некотором расстоянии от активной зоны, что позволяет разместить в этой области головные части нейтронотводов [4]. Всего в мире к настоящему времени было построено 818 исследовательских реакторов и 23 находятся в стадии планирования или создания. Однако работающих реакторов на данный момент всего лишь 227 [5], причём только 51 из них предназначены для исследований на выведенных пучках нейтронов. Таким образом, вместе с источниками нейтронов на основе протонных ускорителей [6] в мире существует около 60 установок с выведенными пучками нейтронов для исследований в области физики конденсированного состояния вещества. Интересно, что количество источников синхротронного излучения, работающих в настоящее время примерно такое же [7].

Развитие источников нейтронов ЛНФ ОИЯИ

Реактор ИБР, созданный в ОИЯИ по инициативе первого директора Института Д.И. Блохинцева, явился по сути первым в мире специализированным источником нейтронов для исследований на выведенных пучках. Имея среднюю мощность всего 1 кВт, по своим возможностям он соответствовал, стационарному реактору мощностью несколько МВт в силу импульсного режима работы с длительностью импульса 36 мкс и частотой повторения от 8 до 80 Гц [8].

Благодаря модернизации системы охлаждения реактор получил возможность работать на средней мощности до 6 кВт [9]. В дальнейшем использовался режим работы со средней мощностью 3 кВт и частотой повторения импульсов 5 Гц, при этом длительность импульса увеличилась до 50 мкс, а пиковая мощность составила около 15 МВт [10].

Длительность импульса является определяющим параметром, обуславливающим энергетическое разрешение для фиксированной пролётной базы: $\frac{\Delta E_n}{E_n} = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot \Delta t^2}{t}\right) + \left(\frac{2 \cdot \Delta L}{L}\right)}$, здесь E_n – энергия нейтрона, t – время пролёта, L – пролётная база, Δt – длительность нейтронного импульса, ΔL – неопределённость пролётной базы, связанная с конечными размерами источника и замедлителя, а также, детектора нейтронов. Если пренебречь вкладом неопределённости пролётной базы, то при сокращении длительности импульса возникает возможность приблизиться к источнику, сохранив энергетическое разрешение на прежнем

уровне, что приведёт к квадратичному росту плотности потока нейтронов в месте размещения экспериментальной установки.

Полученная на первом реакторе ИБР длительность импульса быстрых нейтронов обеспечивала достаточно хорошее энергетическое разрешение на пролётных базах до 1000 метров, однако источник не был рекордным по плотности потока нейтронов при заданном энергетическом разрешении. К концу 50-х годов прошлого века появились источники нейтронов на основе электронных ускорителей с коротким импульсом ($\Delta t < 1 \text{ мкс}$) и высоким выходом нейтронов, что обеспечивало их лидерство. Так в Харуэлле (Великобритания) с 1952 велись исследования ядерных реакций, индуцированных нейтронами с энергией 15-120 МэВ на пучках источника на базе протонного синхроциклотрона с энергией 150 МэВ [11]. Там же в 1959 году заработал нейтронный источник на базе электронного ускорителя с энергией 28 МэВ и мишенью из ^{235}U в подкритическом состоянии. Длительность импульса быстрых нейтронов этого источника варьировалась в диапазоне от 5 нс до 5 мкс, что в сочетании со специализированными замедлителями и пролётными базами от 5 до 300 метров предоставляло широчайшие возможности для исследований [12]. Достаточно подробный обзор по импульсным источникам нейтронов на конец 70-х годов прошлого столетия представлен в работе [13]. Следуя мировым тенденциям в стремлении к более высокому разрешению первый реактор Объединённого института ядерных исследований ИБР в 1964 году был оснащён электронным ускорителем на энергию 30 МэВ и начал работать в бустерном режиме с длительностью импульса порядка 5 мкс [14]. С лета 1968 года реактор ИБР с микротроном начали применять в режиме редких импульсов (1 импульс в несколько секунд), при этом средняя мощность составляла 6 кВт, а мгновенная достигала 1 ГВт! К середине 1968 года был создан более совершенный импульсный реактор ИБР-30 со средней мощностью 25 кВт, который в течение очень короткого времени (с августа 1968 года до июня 1969 года) заменил первый ИБР. С марта 1970 года новый реактор заработал в комплексе с линейным электронным ускорителем ЛУЭ-40 на энергию 40 МэВ с мощностью пучка 2 кВт, обеспечивая импульсную плотность потока тепловых нейтронов на поверхности замедлителя до $10^{14} \text{ н/см}^2/\text{с}$ [15]. Комплекс ИБР-30 + ЛУЭ-40 при использовании выведенных нейтронных пучков в семи направлениях, с пролётными базами от 10 до 1000 метров, позволял вести исследования в диапазоне энергий от мэВ до десятков кэВ при хорошем энергетическом разрешении и высокой интенсивности [10].

Возможности увеличения мощности реакторов типа первого ИБР были практически исчерпаны при создании ИБР-30 в силу того, что газовое охлаждение подвижных модуляторов реактивности с вкладышами из делящегося материала не могло применяться при уровнях мощности более 100 кВт. Поэтому при проектировании импульсного реактора следующего

поколения ИБР-2 со средней мощностью 4 МВт его создатели предложили осуществлять механическую модуляцию реактивности реактора при помощи специальных подвижных отражателей – двух вращающихся вблизи активной зоны реактора роторов [16, 17]. Создание ИБР-2 заняло больше времени по сравнению с первым импульсным реактором Объединенного института. Физический пуск реактора состоялся в период с конца 1977 года до начала 1978 года – более чем через 10 лет после начала работ по проектированию, а энергетический пуск и начало исследований еще на четыре года позже [18, 19]. К началу 80-х годов экспериментальный зал реактора уже был оснащен рядом нейтронных спектрометров [20]. С 1984 года до настоящего времени реактор ИБР-2 работает в течение 2500 часов в год, предоставляя возможности для исследований ученым из разных стран в рамках пользовательской программы, которая была начата в 90-х годах прошлого века [21]. В период с конца 90-х годов до 2011 года была осуществлена модернизация реактора ИБР-2 с временной остановкой реактора в 2007-2010 гг. За это время были заменены основной и вспомогательный модуляторы реактивности, корпус реактора, система контроля и управления, часть натриевых трубопроводов системы охлаждения реактора и другое оборудование. В 2010-2011 были выполнены физический (декабрь 2010г.) и энергетический (июль-октябрь 2011г.) пуски обновленного реактора [22, 23], с 2012 года возобновилась пользовательская программа, и были продолжены исследования на 15 нейтронных спектрометрах [24, 25, 26].

Исследования в области физики конденсированных сред в Дубне

В нейтронографии при помощи медленных нейтронов необходимо измерять угол рассеяния монохроматических нейтронов в случае упругого рассеяния или изменение их энергии в случае неупругого рассеяния. На стационарных источниках нейтронов это осуществляется путем выбора определенной длины волны при помощи монохроматора и сканировании детектором по углу рассеяния. На импульсном источнике нейтронов благодаря методике времени пролета возможно определение характеристик рассеянных на определенном угле нейтронов в широком диапазоне длин волн при использовании точечного детектора нейтронов. В случае использования позиционно-чувствительного детектора большой площади возникает возможность регистрации рассеянных нейтронов в широком диапазоне длин волн и углов рассеяния одновременно.

Работы, использующие нейтронную спектроскопию по времени пролета в исследованиях конденсированных сред, начались на первом реакторе Объединенного института ядерных исследований практически одновременно со спектроскопией нейтронных резонансов. Уже через два года после начала работы первого реактора ИБР по инициативе физиков из института ядерной физики в Кракове создается установка для изучения неупругого рассеяния в обратной геометрии и выполняется исследование квазиупругого рассеяния холодных нейтронов на воде,

а также энергии локальных возбуждений атомов примесей в меди и свинце [27, 28, 29]. В дальнейшем эта установка будет развита в Краковско-дубненский спектрометр обратной геометрии КДСОГ на ИБР-30, а впоследствии в КДСОГ-М и НЕРА-ПР на ИБР-2. Другой тип спектрометра неупругого рассеяния был создан физиками из ФЭИ (Обнинск) [30]. Исследования структуры твердого тела методами дифракции нейтронов на импульсном источнике начались в Дубне и Сверке (Польша) в группе Б.Бураса в 1962 году. Уже в первых исследованиях, выполненных в ЛНФ, были подтверждены многие из предсказанных достоинств дифрактометров по времени пролета, прежде всего, большая скорость набора информации и возможность измерения трехмерных дифракционных спектров [31].

Возникнув на первом импульсном реакторе ОИЯИ ИБР, нейтронография по времени пролета успешно развивалась на ИБР-30, а впоследствии и на ИБР-2. Во время проектирования и строительства ИБР-2 были созданы уникальные установки для малоуглового и неупругого рассеяния, фурье-дифрактометрия, рефлектометрии поляризованных нейтронов, было впервые опробовано импульсное воздействие на образец, синхронизованное с нейтронными импульсами. Пионерские исследования высокотемпературных сверхпроводников, изучение химических реакций в реальном времени, структура рибосомы, изучение механических напряжений и инженерный анализ, структурные фазовые переходы при высоких давлениях – все это было выполнено в течение первых 20 лет работы реактора ИБР-2 и продолжено после его модернизации [32, 33, 34, 25].

В дополнение к нейтронным методам успешно используются в настоящее время и планируются к использованию в будущем возможности синхротронных источников рентгеновского излучения в Национальном исследовательском центре "Курчатовский институт" (Москва, Россия), ESRF (Гренобль, Франция), Spring 8 (RIKEN, Япония), SOLARIS (Краков, Польша) и других центрах [35].

В настоящее время в составе комплекса спектрометров на модернизированном реакторе ИБР-2 успешно работают и развиваются 15 специализированных инструментов в том числе, 8 дифрактометров, один спектрометр малоуглового рассеяния, три рефлектометра (два из которых предоставляют возможность использования поляризованных нейтронов), две установки неупругого рассеяния нейтронов, установка для нейтронной радиографии и томографии. Два выведенных пучка ИБР-2 используются для экспериментов по ядерной физике, на еще одном экспериментальном канале размещается установка для исследования радиационной стойкости материалов и компонентов электронных схем. С 2005 года в Лаборатории освоено производство позиционно-чувствительных детекторов нейтронов на основе многопроволочных пропорциональных камер с линиями задержки, сцинтилляционных

детекторов. Весь комплекс оборудования детектора, включая электронику и программное обеспечение создается в ЛНФ [36].

Результаты исследований, выполненных в ведущих исследовательских нейтронных лабораториях, многие из которых являются центрами коллективного пользования, ежегодно публикуются в тысячах статей, становятся основами патентов в самых различных отраслях науки и промышленности. В качестве примера можно привести ситуацию в Европе, регионе, который на сегодня является лидером в области нейтронных исследований. На европейских источниках нейтронов функционируют около 160 инструментов, которые предлагаются к использованию в рамках пользовательских программ. Эти инструменты ежегодно используются в объеме 30000 инструментодней, обеспечивая научный выход в 1900 научных статей ежегодно, что даёт нам одну публикацию на каждые **16** дней работы инструмента [37]. Можно сравнить эти данные с результатами работы спектрометров ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ в рамках политики пользователей. Ежегодно реактор работает течение 2500 часов, предоставляя 15 спектрометров для проведения исследований. Количество работ, опубликованных на основе данных, полученных в результате этих исследований, составляет примерно 90 в год, что приводит к одной публикации на каждые **17** дней одного спектрометра на ИБР-2.

Импульсный реактор ИБР-2, состояние и перспективы

Глубокая модернизация реактора ИБР-2 была запланирована в связи с завершением установленного конструкторами срока службы основных компонентов установки: корпуса реактора, трубопроводов системы охлаждения и другого оборудования. Эта работа была начата еще в середине 90-х годов прошлого столетия при поддержке Министерства атомной промышленности РФ (ныне Государственной корпорации Росатом). На основе исследований нового типа топливных таблеток, облученных в реакторе ИБР-2 до остановки на заключительный этап модернизации, было принято решение об использовании такого топлива, с центральным отверстием в топливной таблетке. Также было принято решение о создании более компактной активной зоны реактора за счет ликвидации центральных каналов для облучения, которые существовали в первоначальном проекте. В течение более 10 лет выполнялись работы по проектированию нового реактора и подвижного отражателя, научно-техническому обоснованию нового типа топливной загрузки, подготовке на площадке ОИЯИ специализированного участка по сборке тепловыделяющих кассет обновленного реактора из твэлов, изготовленных на ПО «Маяк», и последующего изготовления нового топлива. Длительная остановка реактора для замены основного оборудования заняла только 4 года (2007-2010 г.г.). В настоящее время реактор работает более 2500 часов в год, предоставляя возможность проведения исследований более 100 ученым из стран-участниц ОИЯИ и других

стран мира, которые ежегодно выполняют более 200 экспериментов в рамках пользовательской программы. Сравнимое количество экспериментов выполняется сотрудниками Отделения нейтронных исследований и разработок в области конденсированных сред Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка. Срок службы корпуса реактора, трубопроводов системы натриевого охлаждения, а также созданный на этапе модернизации запас топливных кассет, определяет предел эксплуатации обновленного реактора ИБР-2, установленный Главным конструктором реактора, НИКИЭТ им. Н.А. Доллежала на 2035-2042 гг. в зависимости от условий эксплуатации. Главная задача Лаборатории на этот период – обеспечение надежной и стабильной работы реактора при последовательном плановом продолжении работ по его модернизации, а именно – замене вспомогательного оборудования, которое не было заменено в течение длительной остановки по причине того, что его срок службы еще не был исчерпан. Также первым приоритетом на эти годы будет являться завершение создания и последующее развитие комплекса криогенных замедлителей, оснащение спектрометров ИБР-2 современными нейтронными и детекторными системами, что позволит сохранять ОИЯИ лидирующие позиции в области нейтрографии в физике конденсированных сред до окончания работы ИБР-2.

Мировые тенденции развития источников нейтронов

Бурный рост числа исследовательских реакторов с начала 60-х годов прошлого столетия во второй половине 80-х сменился стабилизацией, а затем и снижением их численности. Главная причина этого явления – та же, что привела и к определенной стагнации в развитии атомной энергетики – тяжелая авария на Чернобыльской АЭС, приведшая к серьёзному загрязнению огромных территорий Украины, Белоруссии, России, некоторых европейских стран. В это же время Карло Руббиа лауреат Нобелевской премии по физике 1984 года предлагает использовать для производства электроэнергии установки с подкритическими сборками из делящихся материалов, управляемые ускорителями протонов или дейтронов, в которых пучок ускоренных до 0,5 – 2 ГэВ заряженных частиц направляется в мишень из тяжелого материала (вольфрам, ртуть, свинец). Научно-экспериментальные разработки таких систем позволили создать источники нейтронов на основе ускорителей тяжелых заряженных частиц с металлическими мишенями с мощностью пучка до нескольких мегаватт, что превышает на 1-2 порядка мощности первых специализированных ускорительных источников нейтронов.

К настоящему моменту технологические ограничения, связанные с теплосъемом в АЗ исследовательского реактора или нейтрон производящей мишени ускорительного источника нейтронов, ограничивают среднюю плотность потока нейтронов на поверхности замедлителя величиной порядка 10^{15} н/см²/с для стационарных исследовательских реакторов и 10^{14} н/см²/с

для импульсных источников нейтронов любого типа. При этом импульсная плотность потока нейтронов в существующих и создаваемых импульсных источниках любого типа не превышает величину 10^{16} н/см²/с, что является, по-видимому, технологическим пределом [38]. Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка предлагает создать в Объединенном институте ядерных исследований источник нейтронов с рекордными на сегодняшний день параметрами, один из вариантов которого – это объединение двух существующих подходов к исследовательским нейтронным источникам – ускорительный и реакторный.

Итак, на сегодняшний день все ведущие, экономически развитые страны мира активно развивают и поддерживают исследовательские источники нейтронов с выведенными пучками для нейтронографических исследований. Лидером является Евросоюз, в котором на 13 нейтронных источниках функционируют 160 инструментов. Флагман будущей европейской нейтронной инфраструктуры – European Spallation Source в ближайшем будущем вступит в строй со стартовым набором инструментов, однако все 22 нейтронных спектрометра заработают только через 13 лет после этого [39, 37]. Очень важно отметить, что потребность в новых источниках нейтронов признается во всех кругах научного сообщества, вовлеченного в исследования на нейтронных пучках. Так лидеры проекта ESS Кен Андерсон и Колин Карлайл (Ken Andersen and Colin Carlile) еще до того, как первые нейтроны были получены на ESS начинают обсуждение нового Европейского нейтронного источника следующего поколения, который должен будет прийти на смену ESS приблизительно через 50 лет [40]. При этом в Европе и в других странах идет работа над проектами источников средней и небольшой интенсивности, которые призваны обеспечить воспроизводство квалифицированных исследователей, способных использовать передовые технологии на источниках с рекордными интенсивностями [41, 42].

В США успешно функционируют и развиваются источники нейтронов на базе протонных ускорителей при том, что исследовательских реакторов, сравнимых по возможностям с тяжеловодным высокопоточным исследовательским реактором в Институте Лауэ-Ланжевена (Гренобль, Франция) в США не было создано [43, 44, 45]. Американское научное сообщество признает, что Соединенные Штаты утратили лидерство в области нейтронных исследований и призывает к созданию новых источников нейтронов как ускорительных, так и реакторов [46].

В России на данный момент близится к завершению создание высокопоточного тяжеловодного исследовательского реактора ПИК в НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ [47, 48]. Однако, как и в случае ESS, весь набор научных инструментов будет доступен для научных исследований спустя длительное время после энергетического пуска реактора, который осуществляется в настоящее время.

Таким образом, реактор ИБР-2 предоставляет уникальную возможность исследователям из стран-участниц Объединенного института в проведении исследований конденсированного состояния вещества методами нейтронного рассеяния на мировом уровне, сохраняя лидирующие позиции ОИЯИ в этой области. Для того, чтобы сохранить это направление исследований, как одно из определенных в Уставе Объединенного института и обеспечить лидерство необходимо будет создать источник нейтронов с выведенными пучками и комплексом современных инструментов к моменту исчерпания ресурса реактора ИБР-2. Наиболее оптимальным представляется вариант, когда новый источник начинает работу до полной остановки ИБР-2, при этом коллектив Лаборатории участвует в реализации экспериментальной программы на ИБР-2 и создает экспериментальные установки на новом источнике. Эта ситуация была реализована во время создания ИБР-2, когда исследования в области физики конденсированных сред велись на реакторе ИБР-30.

Текущее состояние дел по разработке концептуального проекта нового источника нейтронов ОИЯИ

Необходимость создания нового источника нейтронов ОИЯИ, призванного заменить ИБР-2, была осознана в Лаборатории практически сразу же после завершения финального этапа его модернизации. При подготовке 7-летнего плана развития ОИЯИ на 2017–2023 гг. эта задача была включена в окончательную версию документа, как одна из приоритетных. На 42-й сессии Программного комитета по физике конденсированных сред ОИЯИ 22 июня 2015 года в докладе В.Н. Швецова, посвященном заявке основных направлений развития Лаборатории тема создания нового источника прозвучала впервые. На 45 сессии Программного комитета по физике конденсированных сред ОИЯИ 19 января 2017 г. В.Л. Аксенов впервые познакомил членов программного комитета с двумя вариантами нового источника, которые были разработаны в Лаборатории и дал обзор ситуации с нейтронными источниками в Европе на ближайшие десятилетия. К настоящему времени на нескольких сессиях ПКК по физике конденсированных сред сотрудниками Лаборатории были изложены технические детали двух предложенных концепций, дано предварительное обоснование научной программы для нового нейтронного источника. В рамках разработки Стратегии развития ОИЯИ до 2030 года была создана международная Рабочая группа Комиссии по стратегическому планированию ОИЯИ, задачей которой является координация научно-технического обоснования проекта создания «Дубненского источника нейтронов четвертого поколения». Были проведены два заседания этой Рабочей группы в 2018 и 2019 годах, а также в 2018 г. было проведено международное рабочее совещание по предложениям экспериментов на новом источнике. В настоящее время между ОИЯИ и Научно-исследовательским и конструкторским институтом энерготехники

имени Н.А. Доллежала (НИКИЭТ) заключен контракт «Разработка концептуального предложения высокопоточного импульсного источника нейтронов периодического действия на основе протонного ускорителя и размножающей зоны», в рамках которого будет осуществлена конструкторская проработка двух, предложенных Лабораторией вариантов нейтронного источника. Окончательный отчет по договору будет получен в конце 2019 года.

Литература:

- ¹ У С Т А В Объединённого института ядерных исследований. http://www.jinr.ru/wp-content/uploads/Advisory_Bodies/Charter_JINR_1999_rus.doc
- ² C. G. Shull, E. O. Wollan, G. A. Morton, and W. L. Davidson, Neutron Diffraction Studies of NaH and NaD, *Phys. Rev.* **73**, 842 (1948)
- ³ C. G. Shull and J. Samuel Smart, Detection of Antiferromagnetism by Neutron Diffraction, *Phys. Rev.* **76**, 1256 (1949)
- ⁴ S.M. Shapiro, The high flux beam reactor at Brookhaven national laboratory https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/26/074/26074008.pdf?r=1&r=1
- ⁵ Research Reactor Database, International Atomic Energy Agency, <http://nucleus.iaea.org/RRDB/RR/ReactorSearch.aspx>
- ⁶ Database of Neutron Spallation Sources, International Atomic Energy Agency, <https://nucleus.iaea.org/sites/accelerators/Pages/Spallation.aspx>
- ⁷ Database of Synchrotron Light Sources, International Atomic Energy Agency, <https://nucleus.iaea.org/sites/accelerators/Pages/Synchrotron.aspx>
- ⁸ Блохин Г.Е., Блохинцев Д.И. и др. Импульсный реактор на быстрых нейтронах. *Атомная энергия* (1961), **10**, 437
- ⁹ Ананьев В.Д., Мотора ИМ., Погодаев Г.Н. и др. - Препринт ОИЯИ 2372, Дубна, 1965
- ¹⁰ Франк И.М. Развитие и применение в научных исследованиях реактора ИБР. *Физика элементарных частиц и атомного ядра*, **T2** (1972), выпуск 4, с. 805-860
- ¹¹ P. H. BOWEN, J. P. SCANLON, G. H. STAFFORD, J. J. THRESHER. NEUTRON TOTAL CROSS-SECTIONS IN THE ENERGY RANGE 15 TO 120 MeV. *Nuclear Physics* **22** (1961) 640--662
- ¹² M. J. Poole and E. R. Wiblin. The design of a high-intensity pulsed source using a neutron booster target. *Proc. 2nd. Int. Conf. on Peaceful uses of atomic energy, Geneva, vol. 14* (1958) p. 266.
- ¹³ F. W. K. FIRK. NEUTRON TIME-OF-FLIGHT SPECTROMETERS. *NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS* **162** (1979), 539-563
- ¹⁴ F. W. K. FIRK. NEUTRON TIME-OF-FLIGHT SPECTROMETERS. *NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS* **162** (1979), 539-563
- ¹⁵ Бунин Б.Н. и др. Пуск реактора ИБР-30 в режиме импульсного бустера. Сообщение ОИЯИ 13-6213, Дубна, 1972г.
- ¹⁶ Ананьев В.Д. и др. Импульсный реактор с инжектором ИБР-2. Сообщение ОИЯИ 13-4392, Дубна, 1969г.,
- ¹⁷ Ананьев В.Д. и др. Особенности конструкции и оптимизация модулятора реактивности реактора ИБР-2. *Атомная энергия* (1972), т. **31**, вып. 4, с.352-358
- ¹⁸ Ананьев В.Д., Архипов В.А., Бабаев А.И. и др. Физический пуск импульсного исследовательского реактора ИБР-2. *Атомная энергия* (1979), т. **46**, вып. 6, с. 393-400
- ¹⁹ Ананьев В.Д., Архипов В.А., Бабаев А.И. и др. Энергетический пуск реактора ИБР-2 и первые физические исследования на его пучках. *Атомная энергия* (1984), т. **57**, вып. 4, с. 227-234
- ²⁰ Ю.М.Останевич, И.М.Франк, Е.П.Шабалин. РЕАКТОР ИБР-2 СЕГОДНЯ. III Международная школа по нейтронной физике. Алушта 19-30 апреля 1978 г. Сборник лекций. Дубна 1978, ДЗ-11787, с. 7-21
- ²¹ Alexandr V. Belushkin. IBR-2 the fast pulsed reactor at Dubna. *Neutron News* (1991), **2:2**, 14-18, DOI: 10.1080/10448639108218724
- ²² В.Д.Ананьев, А.В.Виноградов, А.В.Долгих и др. Физический пуск модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М). Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2012, P13-2012-41
- ²³ В.Д.Ананьев, А.В.Виноградов, А.В.Долгих и др. Энергетический пуск модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М). Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2012, P13-2012-42
- ²⁴ Аксенов В.Л. Пульсирующий ядерный реактор ИБР-2М. *Наука в России* (2011), № 1. с. 20-24
- ²⁵ В.Л.Аксенов, А.М.Балагуров, Д.П.Козленко. Исследования конденсированного состояния вещества на модернизированном реакторе ИБР-2: от функциональных материалов до нанобиотехнологий. *Физика элементарных частиц и атомного ядра* (2016), т. **47**, вып. 4, с. 1154-1188
- ²⁶ Valery N. Shvetsov. Neutron Sources at the Frank Laboratory of Neutron Physics of the Joint Institute for Nuclear Research. *Quantum Beam Sci.* 2017, **1**(1), 6; <https://doi.org/10.3390/qubs1010006>

- ²⁷ В.В.Голиков, Ф.Л.Шапиро, А.Шкатула, Е.А.Яник. Установка для изучения рассеяния холодных нейтронов. Inelastic Scattering of Neutrons in Solids and Liquids. PROCEEDINGS OF A SYMPOSIUM, CHALK RIVER, 10-14 SEPTEMBER 1962. IAEA. Vienna, 1963, v. **1**, p.119-125
- ²⁸ А.Байорик, В.В.Голиков, И.Жуковская, Ф.Л.Шапиро, А.Шкатула и Е.А.Яник. Квазиупругое рассеяние холодных нейтронов на воде. Inelastic Scattering of Neutrons in Solids and Liquids. PROCEEDINGS OF A SYMPOSIUM, CHALK RIVER, 10-14 SEPTEMBER 1962. IAEA. Vienna, 1963, v. **1**, p. 383-388
- ²⁹ I. Natkaniec, K. Parliński, J.A. Janik, A. Bajorek and M. Sudnik-Hryniewicz. Local vibrations of impurity atoms in copper and lead. The fourth IAEA symposium on neutron inelastic scattering vol. **1**, Proceedings of a symposium, Copenhagen, 20-25 May 1968. IAEA. Vienna, 1968, v. **1**, p. 65-78
- ³⁰ И.И.БОНДАРЕНКО, В.Г.ЛИФОРОВ, М.Н.НИКОЛАЕВ, В.В.ОРЛОВ, В.А.ПАРФЕНОВ, В.А.СЕМЕНОВ, В.И.СМИРНОВ, В.Ф.ТУРЧИН. Двойной спектрометр медленных нейтронов на реакторе ИБР. Inelastic Scattering of Neutrons in Solids and Liquids. PROCEEDINGS OF A SYMPOSIUM, CHALK RIVER, 10-14 SEPTEMBER 1962. IAEA. Vienna, 1963, v. **1**, p.127- 137
- ³¹ Е.Яник. Нейтронные исследования кристаллической решетки и ее квазичастиц. Атомная энергия (1969), т. **27**, вып. 6, с. 533-540
- ³² В. Л. Аксенов. 40 лет нейтронным исследованиям в Дубне. Вестник Российской академии наук (2001), т. **71**, № 5, – с. 415-423
- ³³ В. Л. Аксенов. Нейтронная физика на пороге XXI века. Физика элементарных частиц и атомного ядра: 2000, том **31**, вып. 6, с. 1302-1342
- ³⁴ В. Л. Аксенов. А.М.Балагуров. Дифракция нейтронов на импульсных источниках. Успехи физических наук (2016), т. **186**, №3, с. 293-320
- ³⁵ А.В.Белушкин, Д.П.Козленко, А.В.Рогачев. Синхротронные и нейтронные методы исследования свойств конденсированных сред. Соперничество или сотрудничество? Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2011, №9, с. 18-46
- ³⁶ А.В. Белушкин, А.А. Богдзель, В.В. Журавлев, С.А. Кутузов, Ф.В. Левчановский, Е.И. Литвиненко, Ли Ен Че, Ц.Ц. Пантелеев, В.И. Приходько, А.Н. Черников, А.В. Чураков, В.Н. Швецов. Разработки газонаполненных позиционно-чувствительных детекторов тепловых нейтронов в ЛНФ ОИЯИ. Физика твердого тела, т. **52**, №5, с. 961-963
- ³⁷ ESFRI Scripta Volume I Neutron scattering facilities in Europe Present status and future perspectives ESFRI Physical Sciences and Engineering Strategy Working Group Neutron Landscape Group, ISBN: 978-88-901562-5-0
- ³⁸ В.Л.Аксенов, В.Д.Ананьев, Г.Г.Комышев, А.Д.Рогов, Е.П.Шабалин. О пределе нейтронных потоков в импульсных источниках на основе реакции деления. Письма в ЭЧАЯ, 2017, т. **14**, №5 (210), с. 556-570
- ³⁹ <https://europeanspallationsource.se/>
- ⁴⁰ К.Н. Andersen and C.J. Carlile. A Proposal for a Next Generation European Neutron Source. 2016 J. Phys.: Conf. Ser. 746 012030
- ⁴¹ Thomas Gutberlet, Ulrich Rücker & Thomas Brückel (2017) Neutron News, **28**:3, 20-25, doi:10.1080/10448632.2017.1342486
- ⁴² U. Rücker, T. Cronert, J. Voigt, J.P. Dabruck, P.-E. Doege, J. Ulrich, R. Nabbi, Y. Beßler, M. Butzek, M. Büscher, C. Lange, M. Klaus, T. Gutberlet, and T. Brückel. The Jülich high-brilliance neutron source project. Eur. Phys. J. Plus (2016) **131**: 19, DOI 10.1140/epjp/i2016-16019-5.
- ⁴³ LANSCE: lansce.lanl.gov/
- ⁴⁴ SNS: neutrons.ornl.gov/sns
- ⁴⁵ John J. Rush. US Neutron Facility Development in the Last Half-Century: A Cautionary Tale. Physics in Perspective (2015), v. **17**, issue 2, p.p. 135-155
- ⁴⁶ Neutrons for the Nation Discovery and Applications while Minimizing the Risk of Nuclear Proliferation. A Report by the APS Panel on Public Affairs. July 2018.
- ⁴⁷ Ерыкалов А.Н., Каминкер Д.М., Коноплев К.А., Петров Ю.В., Соколов В.М. Реактор для физических исследований - ПИК. Физика ядерных реакторов (Сборник статей) Изд. ФЭИ, 1966г., т.Ш, с.273
- ⁴⁸ Ковальчук М.В., Аксенов В.Л., Коноплев К.А., Захаров А.С., Самсонов В.М., Смольский С.Л., Драгунов Ю.Г., А.В. Лопаткин, И.Т. Третьяков, Р.П. Куатбеков. Физический пуск реактора ПИК. Планы по подготовке энергетического пуска. Вопросы атомной науки и техники, 2013, вып. 33, с. 24-36

Этапы работы

- Научное обоснование создания нового источника, «белая книга»;
- Разработка и обоснование выбора концептуального предложения высокопоточного импульсного источника нейтронов периодического действия;
- Подготовительные работы по изготовлению топливной загрузки/мишени для нового источника;
- Разработка концепции размещения замедлителей нейтронов, выведенных пучков нейтронов и инструментов;
- Подготовка исходных данных для разработки технического проекта источника с инструментами на выведенных пучках.

Ожидаемый результат по завершении темы

- Техничко-экономическое обоснование конструкции нового источника нейтронов;
- Научное обоснование:
 - Научная программа;
 - Состав парка инструментов для проведения исследований по физике конденсированных сред;
 - Предложения экспериментов по ядерной физике, изучению свойств нейтрона;
- Исходные данные для ТЗ на проектирование нового источника с парком инструментов на выведенных пучках.

Участники от ОИЯИ

Лаборатория	№№ п/п	Ф.И.О.	№№ п/п	Ф.И.О.
ЛНФ	1.	Аксенов В.Л.	14	Рогов А.Д.
	2.	Беляков А.А.	15	Трепалин В.А.
	3.	Булавин М.В.	16	Худоба Д.
	4.	Виноградов А.В.	17	Шабалин Е.П.
	5.	Долгих А.В.	18	Швецов В.Н.
	6.	Козленко Д.П.		
	7.	Куликов О.		
	8.	Куликов С.А.		
	9.	Кучерка Н.		
	10	Лычагин Е.В.		
	11	Мухин К.А.		
	12	Пепельшев Ю.Н.		
	13	Рзянин М.В.		

Участвующие страны, институты и организации

Страна или международная организация	Город	Институт или лаборатория	Участники	Статус
Россия	<u>Москва</u>	<u>НИКИЭТ им. Н.А.Доллежала</u>	<u>Третьяков И.Т. + 20 чел., Лопаткин А.В. + 20 чел.</u>	Совместные работы
	<u>Москва</u>	<u>ВНИИНМ им. А.А.Бочвара</u>	<u>Иванов Ю.А. + 5 чел.</u>	Совместные работы
	Москва	НИЦ КИ	Эмм В.Т. + 2 чел.	Совместные работы
	Москва, Троицк	ИЯИ РАН	Садыков Р.А. + 2 чел.	Совместные работы
	Гатчина	НИЦ КИ ПИЯФ	Григорьев С.В. Булкин А.П. + 2 чел.	Совместные работы
Беларусь	Минск	БГТУ	Дормешкин О.Б. +2чел.	Совместные работы
Румыния	Бухарест	INCDIE ICPE-CA	Добрин И.	Совместные работы
Аргентина	Барилоче	СAB	Р. Гранада	Совместные работы
Чехия	Ржеж	NPI ASCR	Штрунц П. + 1 чел.	Совместные работы
Венгрия	Будапешт	Wigner RCP	Рошта Л. + 2 чел.	Совместные работы
Германия	Берлин	HZB	Вильперт Т.	Совместные работы
	Юлих	FZJ	Иоффе А.	Совместные работы
Швеция	Лунд	ESS ERIC	Холуилтон Р. + 3 чел.	Совместные работы
<u>Франция</u>	<u>Гренобль</u>	<u>ILL</u>	<u>Несвижевский В.</u>	Совместные работы
<u>Узбекистан</u>	<u>Ташкент</u>	<u>АНРУ ИЯФ</u>	<u>Ташметов М.</u>	Совместные работы
ЮАР	Претория	Университет Претории	С. Ракитянский	Совместные работы

Сроки выполнения работы

2020 – 2022 г.г.

Полная сметная стоимость темы

№№ п/п	Наименование работ	Полная стоимость	Расходы в год (тыс. долл. США)		
			1-й год	2-й год	3-й год
1.	Разработка и обоснование выбора концептуального проекта нового источника	1354 k\$	437 k\$	451 k\$	466 k\$
2.	Подготовительные работы по созданию топлива/мишени для нового источника	1354 k\$	437 k\$	451 k\$	466 k\$
3.	Научное обоснование проекта создания нового источника с парком инструментов	451 k\$	146 k\$	150 k\$	155 k\$

	на выведенных пучках.				
4.	Обустройство рабочих мест для новых сотрудников	272 k\$	88 k\$	91 k\$	93 k\$
ВСЕГО		3431 k\$	1108 k\$	1143 k\$	1180 k\$

Другие источники финансирования

Смета затрат по теме

№№ статей	Наименование статей бюджета	ВСЕГО 2020–2022 гг.	в т.ч. 2020 г.
1	Заработная плата	841 k\$	254 k\$
2	Страховые взносы	255 k\$	77 k\$
3	Соцбытфонд	55 k\$	17 k\$
4	МНТС	300 k\$	100 k\$
6	Оборудование	180 k\$	60 k\$
10	НИОКР	1800 k\$	600 k\$
ИТОГО		3431 k\$	1108 k\$

СОГЛАСОВАНО:

Главный ученый секретарь ОИЯИ

_____/_____/_____
 “ ____ “ _____ 2019 г.

Директор лаборатории

_____/_____/_____
 “ ____ “ _____ 2019 г.

Начальник Планово-финансового отдела

_____/_____/_____
 “ ____ “ _____ 2019 г.

Ученый секретарь лаборатории

_____/_____/_____
 “ ____ “ _____ 2019 г.

Начальник Научно-организационного отдела

_____/_____/_____
 “ ____ “ _____ 2019 г.

Экономист лаборатории

_____/_____/_____
 “ ____ “ _____ 2019 г.

Руководитель темы

_____/_____/_____
 “ ____ “ _____ 2019 г.

Руководитель темы

_____/_____/_____
 “ ____ “ _____ 2019 г.