Приложение 3.

Форма открытия (продления) Проекта

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института

_____ / _____ /

“____“ _____ 202_ г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОТКРЫТИЯ / ПРОДЛЕНИЯ ПРОЕКТА/ ПОДПРОЕКТА ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ

1. Общие сведения о проекте

1.1. Шифр темы (для продлеваемых проектов) – *(шифр темы включает дату открытия, дата окончания указывается для инфраструктурной темы, т. к. она определяется сроками завершения проектов в теме).*

02-1-1107-2024

1.2. Шифр проекта (для продлеваемых проектов/ подпроектов) 07-1-1107-1-2011/2027

1.3. Лаборатория: ЛФВЭ

1.4. Научное направление: прикладные исследования на комплексе NICA

1.5. Наименование проекта: ADSR (подкритический реактор с ускорителным приводом)

1.6. Руководитель(и) проекта: Параипан М., Белов О. В.

1.7. Заместитель(и) руководителя проекта: Хушвактов Ж. Х.

1.8. Научный руководитель проекта

2. Научное обоснование и организационная структура

2.1. Аннотация

Серия теоретических исследований, проведенных в рамках проектов E&T (энергия и трансмутация) и ADSR (подкритический реактор с ускорителем приводом) в ОИЯИ, Дубна, подчеркнула преимущества подкритических реакторов как эффективного

источника энергии с коэффициентом прироста энергии G>15. Значение эффективного коэффициента размножения нейтронов k_{eff} в диапазоне 0,985–0,988, поддерживаемое при работе реактора с помощью регулирующих стержней, достаточно низкое, чтобы избежать достижения критичности во время неуправляемых переходных процессов, и обеспечивает более безопасную эксплуатацию по сравнению с реакторами на быстрых нейтронах. Выбор более крупной конфигурации активной зоны позволяет реализовать требуемое значение эффективного коэффициента размножения нейтронов при меньшем обогащении, обеспечивая также более длительный цикл с более глубоким выгоранием актинидов (в 2–3 раза глубже, чем в реакторах на быстрых нейтронах). Один из наиболее интересных выводов касается возможности использования ионных пучков из ^{7}Li или ^{9}Be с низкой энергией (0,25–0,3 ГэВ/нуклон) вместо протонов с энергией 1–1,5 ГэВ, при той же самой электрической мощности требующих ускоритель вдвое меньшей длины, что повышает эффективность и снижает затраты на строительство и обслуживание.

Анализ возможных экспериментов, направленных на проверку результатов теоретических исследований, показывает, что измерения выхода нейтронов из конвертеров или распределения продуктов деления только на поверхности конвертера не позволяют корректно сравнить энергетическую эффективность различных пучков, используемых в ADSR. Наиболее достоверное сравнение можно получить, измеряя распределение продуктов деления внутри протяжённой мишени. Были проанализированы различные конфигурации и материалы для такой мишени (уран, свинец, графит, с топливными стержнями и без них). На основе проведенного анализа была разработана протяжённая свинцовая мишень LETASUR.

Мишень LETASUR (Lead Target for the study of Accelerator driven SUbcritical Reactors) предназначена для сравнительного изучения энергоэффективности протонных и ионных пучков, используемых для управления подкритической активной зоной. В качестве имитации свинцово-висмутового теплоносителя используется свинцовый блок размером 80×80×150 см, окруженный стальной оболочкой толщиной 10 см. В мишени имеется центральное отверстие радиусом 10 см и длиной 120 см для размещения конвертера, а также горизонтальные и вертикальные отверстия диаметром 3 см, расположенные на 4 радиусах (15, 20, 25 и 30 см) для размещения детекторов. В центральном отверстии размещены конвертеры из бериллия и свинца общей длиной 110 см, обеспечивающие окно для пучка длиной 10 см, а также отверстия длиной 150 см в горизонтальном и вертикальном направлениях на разных радиусах для размещения детекторов. Будут протестированы протонные пучки с энергией в диапазоне 0,5–2 ГэВ и пучки ионов до ^{12}C с энергией от 0,25 до 0,75 ГэВ/нуклон, и проанализировано распределение деления ядер в фольгах из природного и обогащенного урана.

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

2.1.1. Перспективы ADSR

Идея подкритического реактора, управляемого пучком ускоренных частиц, изначально возникла для решения проблемы ядерных отходов, поскольку более жесткий спектр нейтронов обеспечивает более эффективное выгорание актинидов. Первые попытки использовать ускорители в качестве источников нейтронов были предприняты в конце 1940-х годов Э. О. Лоуренсом в США и В. Н. Семеновым в Советском Союзе. Исследования по превращению воспроизводящих изотопов урана и тория в делящиеся проводились в США в Ливерморской национальной лаборатории им. Э. Лоуренса [3], в Канаде группой Льюиса в Чок-Риверсе [4] и группой Гольдштейна и Василькова в Дубне

[5], но на тот момент не привели к практическим результатам, поскольку интенсивность пучков, достигаемая в ускорителях того времени, была на много порядков ниже необходимой для ADSR.

Прогресс в области ускорителей элементарных частиц, достигнутый к 1990-м годам, открыл перспективы получения квазинепрерывных пучков с интенсивностями порядка 10^{16}, необходимыми для ADSR, и возродил интерес к этой области. Первая схема ADSR была описана группой Боумена в начале 90-х годов [6]. Изначально ADSR рассматривался в основном как способ трансмутации ядерных отходов. Предлагаемая установка так и называлась - «Ускорительная трансмутация отходов» (Accelerator Transmutation of Waste, ATW). Были проанализированы требования к пучкам для создания установки ATW с замкнутым топливным циклом.

Два года спустя команда Руббиа показала, что подкритический реактор на основе U-Th цикла, управляемый интенсивным пучком протонов, может обеспечить высокий коэффициент усиления энергии, работая одновременно и как источник энергии, и как трансмутатор [7]. Они ввели понятие «усилитель энергии» (Energy Amplifier, EA) и пришли к выводу, что оптимальным пучком для ADS является протонный пучок с энергией около 1 ГэВ.

Этой теме посвящено множество программ и проектов по всему миру (программа EUROTRANS, проекты MYRRHA и ESS в Европейском союзе, программа OMEGA в Японии, CIADS в Китае), и все они основаны на использовании пучков протонов. Почти все сходятся во мнении, что оптимальным пучком является пучок протонов с энергией около 1–1,5 ГэВ [8–11]. Лишь немногие авторы изучали возможность использования ионных пучков, и все они пришли к выводу, что ионные пучки менее эффективны, чем пучки протонов, за исключением группы Кошкарёва. Последняя проанализировала протоны и ионы от ^{12}C до ^{20}Ne и пришла к выводу, что оптимальная энергия протона составляет 1 ГэВ, а оптимальным пучком для ионов является пучок ^{20}Ne с энергией 3 ГэВ/нуклон и током пучка 30 мА [12]. Но практическое использование такого пучка нереалистично по двум причинам. Во-первых, их предложение подразумевает создание линейного ускорителя в 6 раз длиннее, чем для протонов. Во-вторых, пучок ионов ^{20}Ne с током 30 мА для и энергией 3 ГэВ/нуклон не позволяет охлаждать активную зону реактора. В работе [13] мы показали, что максимальная масса и энергия ионов ограничены возможностью охлаждения активной зоны.

Выводы всех этих авторов основаны на неверном способе расчета коэффициента усиления по энергии G, при котором эффект (выделяемая мощность, количество делений или множественность нейтронов) соотносится с мощностью пучка.

Мы подчеркнули, что правильный метод расчета G заключается в определении отношения вырабатываемой электрической мощности P_{prod} к электрической мощности, затрачиваемой на ускорение пучка P_{spent} [14, 15]. P_{prod} рассчитывается на основе данных о выделившейся энергии и интенсивности пучка с использованием коэффициента преобразования тепловой энергии в электрическую, равного 0,4. P_{spent} представляет собой сумму двух компонентов: мощности, передаваемой пучку, и мощности, затрачиваемой на поддержание работы ускорителя P_{acc}. Был разработан метод расчета $P_{spent,}$ основанный на масштабировании данных об эффективности ускорителя для эталонной частицы. В линейных ускорителях P_{acc} пропорциональна длине ускорителя и зависит от соотношения $A \cdot E/Z$, а в циклотронах - пропорциональна площади ускорителя и зависит от соотношения $(A \cdot p/Z)^2$. Здесь A - массовое число, Z - атомный номер, E - энергия на нуклон, p - импульс на нуклон, I_b - интенсивность пучка.

Формула для расчета энергии, затраченной в линейном ускорителе, выглядит следующим образом:

$$P_{spent} = A \cdot E \cdot I_b \left[1 + \left(\frac{1}{\eta_0} - 1\right)\frac{Z_0}{Z}\frac{I_{b0}}{I_b}\right] \quad (1)$$

и в циклотроне:

$$P_{spent} = A \cdot E \cdot I_b \left[1 + \left(\frac{1}{\eta_0} - 1\right)\frac{E_0}{E}\frac{A}{A_0}\frac{I_{b0}}{I_b}\left(\frac{Z_0}{Z}\frac{p}{p_0}\right)^2\right] \quad (2)$$

Индекс 0 соответствует эталонной частице. Мы распространили наше теоретическое исследование на ионы и показали, что ионы, начиная с некоторой пороговой энергии (зависящей от массы иона), обеспечивают более высокое значение G, чем протоны. Зависимость G и чистой электрической мощности P_{net} от массы и энергии частиц представлена на рис. 1 для линейного ускорителя (a, b) и циклотрона (c, d). В случае линейного ускорителя эталонной частицей является протон с энергией 2 ГэВ и эффективностью ускорителя η_0 0,18 (данные проекта ESS [16]). В случае циклотрона использовались данные PSI [17] (протоны с энергией 0,6 ГэВ и η0 0,25). Интенсивность пучка $1{,}5 \cdot 10^{16}$ частиц/с.

Значения G, полученные на линейном ускорителе, немного выше, чем на циклотроне, но P_{net} практически не отличается, поскольку P_{spent} составляет всего несколько процентов от P_{prod}. Высокое значение G (>15) делает ADSR эффективным источником энергии, более эффективным, чем термоядерные электростанции, где значение G ожидается на уровне 3–4 [18, 19]. В случае с термоядерными электростанциями большое количество энергии тратится на удержание плазмы, что ограничивает значение G. В случае с ADSR ситуация иная. При интенсивности пучка выше 10^{16} частиц/с мощность, необходимая для поддержания работы ускорителя, составляет всего несколько процентов от вырабатываемой мощности. Это главное преимущество ADSR по сравнению с термоядерными электростанциями. Таким образом, ADSR может стать эффективным источником энергии. Дополнительные затраты, связанные с необходимостью строительства ускорителя частиц, компенсируются повышенной безопасностью, высоким коэффициентом преобразования энергии и снижением общей стоимости замкнутого топливного цикла за счёт более глубокого сжигания актинидов в каждом цикле.

Наиболее интересный вывод касается возможности использования ионов, таких как ^{7}Li или ^{9}Be, с энергиями 0,25-0,3 ГэВ/н, вместо протонов с энергией 1-1,5 ГэВ. Используя такие ионные пучки, можно получить почти такой же P_{net}, но в ускорителе в 2 раза меньших габаритов, что обеспечивает более высокую производительность и меньшие затраты на строительство и эксплуатацию. Необходимым условием для работы ADSR является наличие интенсивного и стабильного пучка (интенсивность выше 10^{16} р/с, несколько десятков случаев сброса пучка в год со временем восстановления более 5 минут). Это представляет собой серьезный вызов для ускорительной техники. Такая интенсивность пучка достигается в настоящее время только на протонном циклотроне PSI. Первые результаты по получению высокоинтенсивного пучка ^{7}Li с энергией в несколько МэВ представлены в [20].

С помощью моделирования и теоретических расчетов были изучены различные факторы, влияющие на эффективность ADSR: факторы, связанные со структурой активной зоны, типом и энергией частиц, а также типом ускорителя. Выделяемая энергия, плотность потока частиц и эффективный коэффициент размножения нейтронов были получены в результате моделирования с помощью программы Geant4. Реактор был смоделирован как система топливных стержней, окружающих конвертер и погруженных в ванну с эвтектическим свинцово-висмутовым теплоносителем (LBE). Эволюция изотопов и распределение температуры были рассчитаны с помощью программ, разработанных в рамках инструментария ROOT (подробности см. в [14, 15]). С точки зрения активной

зоны важны три фактора: оптимальное значение эффективного коэффициента размножения нейтронов, материал конвертора, и степень обогащения.

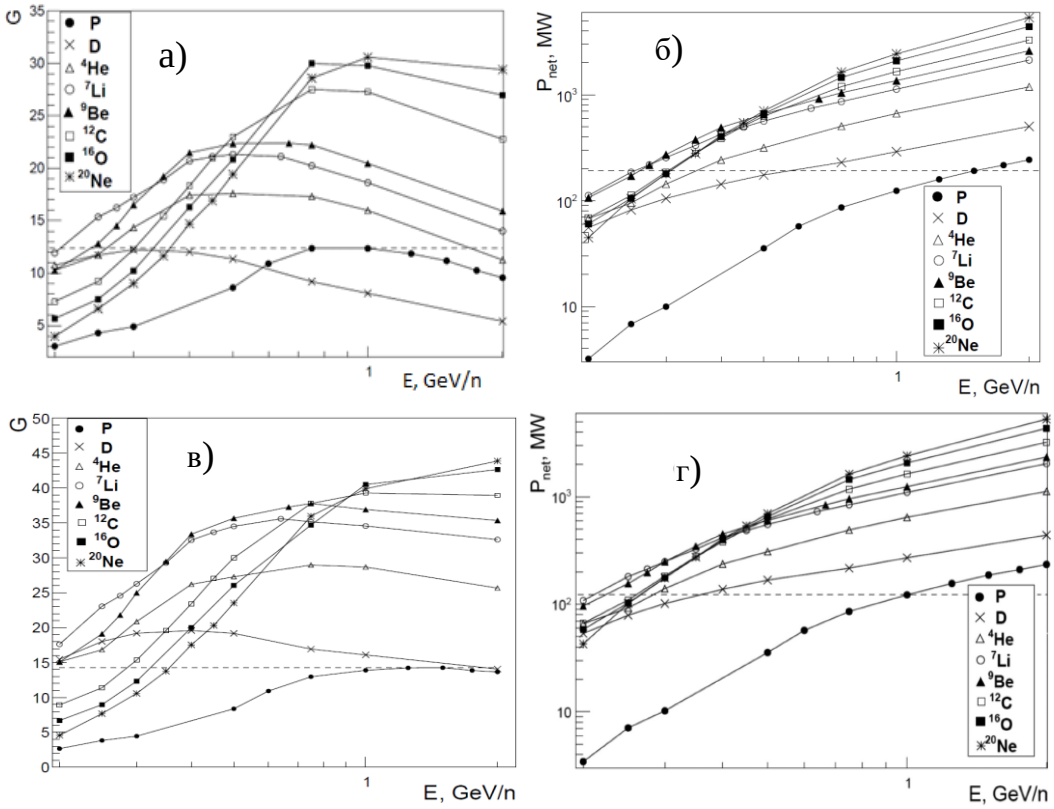

Рис. 1. Зависимость G и P_{net} от энергии частиц, ускоренных в линейном ускорителе (а, б) и циклотроне (в, г), в активной зоне с k_{eff} 0,985.

Рабочее значение k_{eff} должно быть достаточно низким, чтобы обеспечить безопасную эксплуатацию, но при этом как можно более высоким, чтобы максимизировать прирост энергии. Активная зона с охлаждением свинцом или жидкометаллическим электролитом обладает более высокой устойчивостью к переходным процессам благодаря более высокой температуре кипения теплоносителя, превышающей температуру плавления топлива и оболочки твэлов, что снижает риск расплавления активной зоны до уровня, при котором расплавится лишь небольшая группа тепловыделяющих элементов. При правильной конструкции все коэффициенты обратной связи по реактивности можно сделать отрицательными, а введение положительной реактивности можно ограничить до 400 pcm [14]. Анализ изменения мощности во время неуправляемых переходных процессов (НПП) с превышением мощности показывает, что даже в активной зоне с k_{eff} 0,996 критическое состояние не достигается и система переходит в новое устойчивое состояние (рис. 2a). Значение k_{eff} 0,988 обеспечивает двукратный запас безопасности при введении положительной реактивности [15].

По сравнению с реакторами на быстрых нейтронах ADSR имеет дополнительный механизм безопасности: возможность заглушить реактор, остановив пучок. Значение k_{eff} ниже 0,99 обеспечивает быстрое снижение мощности при остановке пучка, что эквивалентно установке стержней аварийной защиты в реакторе БН-800 (рис. 2b). Следовательно, рекомендуемое значение k_{eff} находится в диапазоне 0,985–0,988. Наш вывод аналогичен значению 0,985 для k_{eff}, рекомендованному в [21].

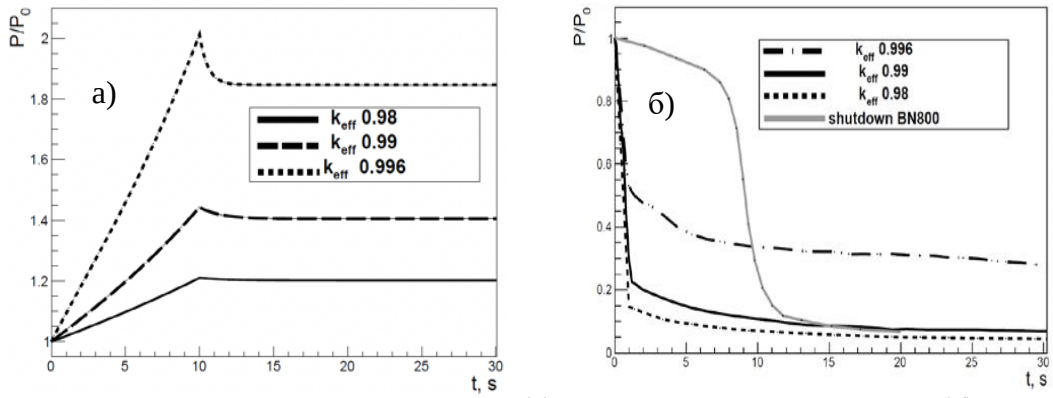

Рис. 2. Изменение мощности в UTOP (а) и после выключения пучка (б) в ADSR с топливом U-Pu-10%Zr и k_{eff} 0,98, 0,99, 0,996.

Предпочтительнее использовать геометрию, позволяющую достичь необходимого коэффициента размножения при более низком обогащении, что обеспечивает более длительный цикл и более глубокое выгорание актинидов. За цикл можно сжечь 15–20 % от исходной массы актинидов, что в 2–3 раза больше, чем в реакторах на быстрых нейтронах (6–7 %), и это является одним из главных преимуществ ADSR. По этой причине наш подход к созданию промышленного ADSR заключается в том, чтобы начинать с низкого обогащения и использовать массу воспроизводящего материала в качестве источника делящихся изотопов, концентрация которых сначала увеличивается, а затем медленно снижается. Для такого ADSR необходимо использовать регулирующие стержни во время работы. Изменяя положение регулирующих стержней, можно поддерживать постоянными флюенс, коэффициент размножения нейтронов и мощность реактора. Изменение коэффициента размножения нейтронов во времени происходит медленно, и его несложно контролировать и поддерживать на безопасном уровне. Значение коэффициента размножения нейтронов в начале цикла необходимо тщательно измерить с помощью различных экспериментальных методов (импульсный источник нейтронов, метод прерывания пучка, метод площадей), а также отрегулировать структуру активной зоны, чтобы добиться значения коэффициента размножения нейтронов ~0,985. Во время цикла мощность реактора контролируется в режиме реального времени. При увеличении мощности на 10–15 % регулирующие стержни перемещаются до тех пор, пока мощность не вернётся к исходному значению. Таким образом, коэффициент размножения нейтронов поддерживается в безопасных пределах, поскольку увеличение коэффициента размножения нейтронов с 0,985 до 0,988 приводит к росту мощности на 25 %. В конце цикла топливо перерабатывается путем извлечения продуктов деления, добавляется некоторое количество свежего делящегося материала, и начинается новый цикл. В принципе, ADSR может перерабатывать любую смесь актинидов, но на продолжительность цикла влияет ее исходный состав. Состав свежего топлива, добавляемого в начале цикла, должен быть подобран таким образом, чтобы максимально увеличить продолжительность цикла. Таким образом, ADSR можно рассматривать не только как способ переработки топлива, не содержащего урана, но и как альтернативу критическим реакторам. В ADSR можно использовать топливо как на основе урана, так и на основе тория. В активной зоне с заданным значением k_{eff} энергия, вырабатываемая при использовании различных пучков, одинакова, независимо от того, какое топливо используется — урановое или ториевое. Однако для ториевых реакторов требуется более высокая степень обогащения по сравнению с урановыми реакторами с той же геометрией и тем же значением k_{eff}. Следовательно, продолжительность цикла и масса актинидов, сжигаемых за цикл, в ториевых реакторах примерно в 2 раза меньше [22].

Что касается материала, используемого для конвертера, то для протонных пучков оптимальными считаются тяжелые металлы. Свинец и LBE предпочтительны из-за возможности их одновременного использования в качестве конвертера и теплоносителя [7, 11]. Но в случае с ионными пучками, особенно при низких энергиях, материалы с низким атомным номером более предпочтительны из-за увеличения пробега ионов и, как следствие, увеличения выхода нейтронов высоких энергий [13]. Наилучшие результаты достигаются при использовании конвертера из бериллия.

Помимо типа и энергии пучка частиц, используемого для приведения в действие подкритического реактора, еще одним важным фактором, влияющим на эффективность ADSR, является интенсивность пучка. Для эффективной работы ADSR требуется квазинепрерывный пучок с интенсивностью выше 10^{16} частиц/с. Более точная оценка влияния интенсивности пучка на значение G требует учета эффективности передачи энергии в радиочастотных (РЧ) резонаторах. В формулах (1) и (2) предполагается, что энергия передается пучку со 100-процентной эффективностью. Такой подход дает несколько завышенные значения G при высокой интенсивности пучка. С учетом η_b мощность, затрачиваемая на ускорение в линейном ускорителе частиц с массовым числом A, атомным номером Z, энергией на нуклон E и интенсивностью пучка I_b, определяется следующим образом:

$$P_{spent} = AEI_b\left[\frac{1}{\eta_b} + \frac{I_{b0}Z_0}{I_bZ}\left(\frac{1}{\eta_0} - \frac{1}{\eta_{b0}}\right)\right] \quad (3)$$

Зависимость G от интенсивности пучка представлена на рисунке 3 для трех значений: 1, 0,9 (достигается в сверхпроводящих резонаторах) и 0,7 (в резонаторах с нормальной проводимостью) [23]. Использование сверхпроводящих резонаторов предпочтительнее, особенно для пучков высокой интенсивности. Однако следует отметить, что результирующая электрическая мощность практически не меняется из-за высоких значений G. Теоретические результаты, представленные на рис. 3, соответствуют ускоренному в линейном ускорителе (LINAC) пучку ^{7}Li с энергией 0,3 ГэВ/нуклон, который взаимодействует с Be-конвертером и активной зоной с k_{eff} = 0,986.

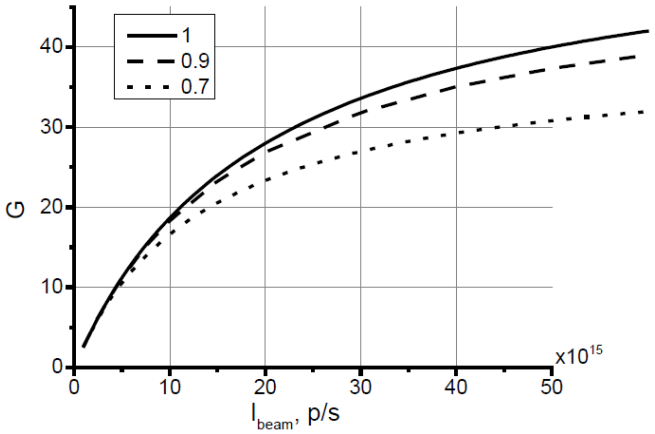

Рис. 3. Зависимость прироста энергии G от интенсивности пучка и эффективности передачи энергии в радиочастотных (РЧ) резонаторах η_b (подкритическая активная зона с k_{eff} = 0,986, пучок ^{7}Li с энергией 0,3 ГэВ/н).

Максимальная интенсивность пучка и, следовательно, мощность, которая может быть достигнута в реакторе, ограничены теплофизическими свойствами топлива и пиковым коэффициентом (PF) распределения мощности. PF в ADSR выше, чем в реакторе на быстрых нейтронах (FR). Пучок протонов, взаимодействующий с LBE конвертером в активной зоне с равномерным обогащением, приводит к распределению мощности с PF ~2. Распределение мощности, полученное с помощью ионных пучков и Be-конвертера,

имеет сильный пик вблизи конвертера в активной зоне с равномерным обогащением. В этой ситуации распределение можно скорректировать, используя неравномерное распределение обогащения. Необходимо начать с низкого уровня обогащения в непосредственной близости от конвертера, постепенно повышая его до базового значения в 2–5 слоях топливных стержней. Таким образом, можно реализовать конфигурацию с разным коэффициентом размножения нейтронов, как показано на рисунке 4. Следует отметить, что снижение коэффициента размножения нейтронов при сохранении того же уровня обогащения уменьшает вклад нейтронов с высоким коэффициентом важности в общее количество делений и приводит к снижению выделяемой энергии. В активной зоне с равномерным обогащением пучок ^{7}Li с энергией 0,25 ГэВ/нуклон генерирует такое же количество выделяемой энергии, как и протоны с энергией 1,5 ГэВ [13], но в активной зоне с PF~2 необходимо увеличить энергию ^{7}Li до 0,3 ГэВ/нуклон. Значения выделяемой энергии, соответствующие распределениям, представленным на рисунке 4, приведены в таблице 1.

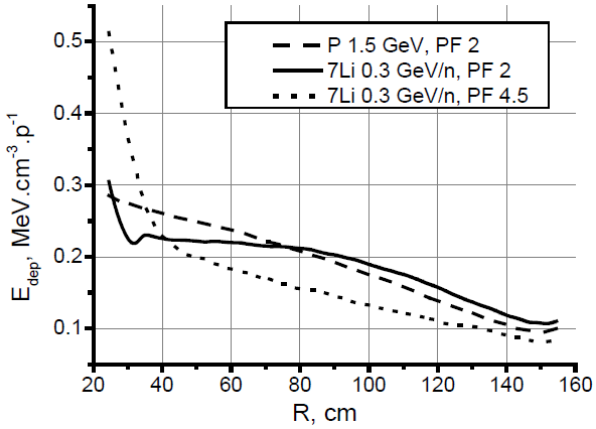

Рис. 4. Радиальное распределение плотности энергии в центральной части активной зоны с k_{eff} = 0,986, облучаемой ^{7}Li с энергией 0,3 ГэВ/нуклон и протонами с энергией 1,5 ГэВ.

Таблица 1. Зависимость выделяемой энергии $\mathbf{E_{dep}}$ от PF в активной зоне с $\mathbf{k_{eff}}$ = 0,986.

Particle/Energy, GeV/n	**PF**	**E_{dep}, MeV/p**
P/1.5	2	$2.85*10^{5}$
^{7}Li/0.3	4.5	$2.85*10^{5}$
	2	$2.85*10^{5}$

Температура в самом горячем канале во время различных неуправляемых переходных процессов должна оставаться в безопасных пределах. Для обеспечения стабильности топлива, максимальная температура на оси твэла должна быть как минимум на 100 К ниже температуры плавления его компонентов. В случае нитридного топлива максимальная мощность ограничивается условием, согласно которому во время работы реактора температура топлива не должна превышать 2300 К, чтобы избежать его разложения. Что касается оболочки, то для безопасной работы необходимо поддерживать температуру на границе оболочки и теплоносителя ниже 1023 К во время переходных процессов, чтобы избежать повреждения оболочки.

Наиболее требовательным к условиям является неуправляемый переходный процесс с превышением мощности пучка (UBOP). Это утверждение подтверждается рисунком 5. На рисунке 5а показана динамика изменения мощности реактора при неуправляемой потере теплоносителя (ULOF), неуправляемом превышении мощности реактора (UTOP) и неуправляемом превышении мощности пучка (UBOP).

Соответствующая динамика изменения максимальной температуры твэла показана на рисунке 5b. Результаты получены для активной зоны с нитридным топливом, облучаемой пучком ^{7}Li с энергией 0,3 ГэВ/н и интенсивностью $2\cdot10^{16}$ ч/с. Переходные процессы развивались в течение 10 с. При UTOP предполагалось увеличение реактивности на 400 pcm, а при UBOP — двукратное увеличение интенсивности пучка. Стационарное распределение выделяемой энергии и значения коэффициентов реактивности (доплеровский коэффициент реактивности топлива α_D=-0.82 pcm/K, коэффициент реактивности теплоносителя α_C=-0.12 pcm/K, радиальный коэффициент реактивности α_R=-0.71 pcm/K, осевой коэффициент реактивности α_A=-0.82 pcm/K) были получены в результате моделирования в Geant4. Мощность в момент времени t, полученная в результате моделирования $P_0(t)$, скорректирована с учетом обратной связи по реактивности.

$$P(t) = P_0(t)\frac{\rho_0}{\rho(t)} \tag{4}$$

где ρ_0 реактивность в стационарном состоянии, а $\rho(t)$ скорректированная реактивность с учетом разницы между средней температурой топлива (теплоносителя) $T_f(T_C)$ в момент времени t и средней температурой в стационарном состоянии $T_{f0}(T_{C0})$:

$$\rho(t) = \rho_0 + (\alpha_D + \alpha_A)(T_f(t) - T_{f0}) \tag{5}$$

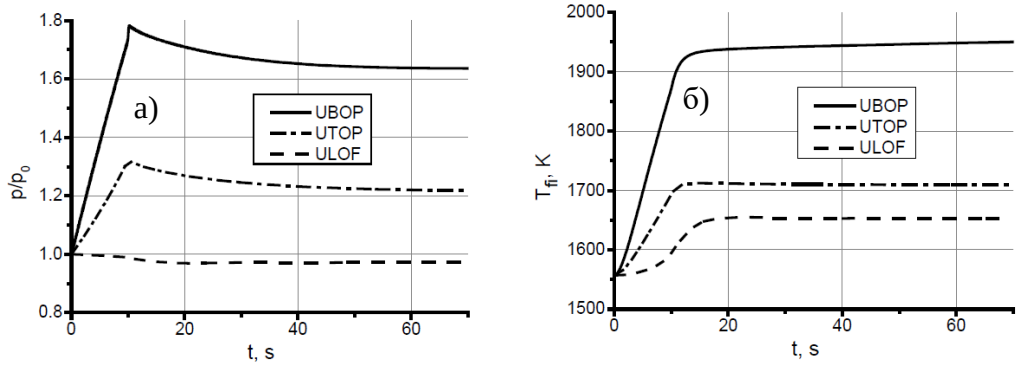

Рис. 5. Изменение мощности (а) и максимальной температуры топлива вдоль осевой линии (б) в активной зоне во время переходных процессов ULOF, UTOP и UBOP при k_{eff} = 0.986.

Распределение температуры рассчитывалось с использованием метода контрольных объемов для дискретизации уравнений теплопередачи и полностью неявной схемы. Для каждого исследуемого вида топлива была рассчитана динамика изменения температуры во время UBOP при различных интенсивностях пучка, а также определена максимально допустимая интенсивность пучка. Результаты приведены в таблице 2. На рисунке 6а показана температура в центре топливных элементов в самом горячем канале в новом стационарном состоянии, достигнутом при UBOP, при интенсивностях пучка из таблицы 2, а на рисунке 6б — температура поверхности топливных элементов.

Металлическое топливо, несмотря на самую высокую теплопроводность, имеет самую низкую температуру плавления (1390 К) и обеспечивает самую низкую удельную мощность. Максимальная электрическая мощность, получаемая в ADSR с металлическим топливом, составляет $\sim$150 МВт. Оксидное топливо имеет высокую температуру плавления (3023 К), но низкую теплопроводность, и максимальная мощность составляет менее 300 МВт. Металлическое и оксидное топливо подходит для ADSR малой мощности. Карбидное и нитридное топливо можно использовать в реакторах средней мощности с электрической мощностью 650–750 МВт. Наибольшей электрической мощности можно достичь при использовании нитридного топлива, обеспечивающего G~30.

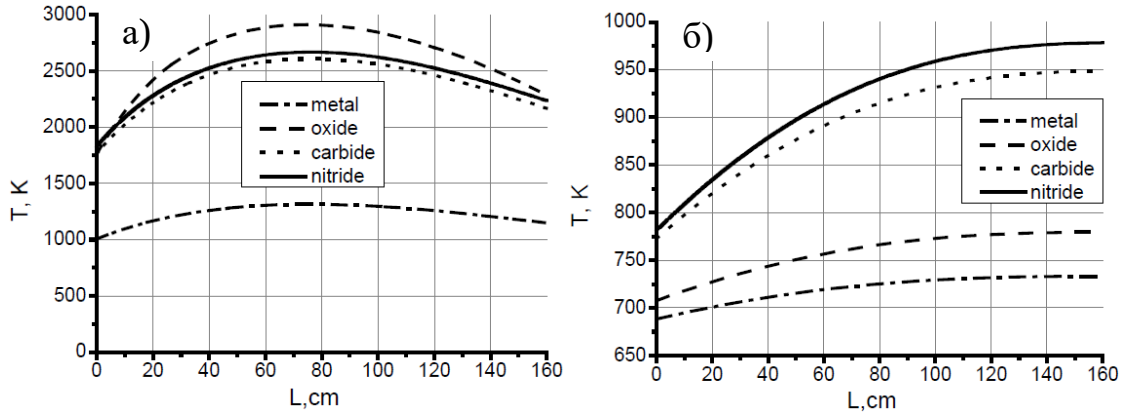

Рис. 6. Распределение температуры по оси твэла (а) и температуры внешней оболочки (б) в новом стационарном состоянии, достигнутом в UBOP.

Таблица 2. Максимальная интенсивность пучка I_{bmax}, электрическая мощность P_{el}, G для различных видов топлива и их значения η_b.

Fuel	I_{bmax}, p/s	P_{el}, MW	G, $\eta_b = 0.7$	G, $\eta_b = 0.9$
metal	8×10^{15}	154	15	16.5
oxide	1.5×10^{16}	282	20.5	23.3
carbide	3.6×10^{16}	677	28	33.5
nitride	4×10^{16}	752	29.2	35

Поскольку проблема создания необходимого ускорителя до сих пор не решена, важно определить оптимальные частицы и энергию, а также построить соответствующий ускоритель. Наши теоретические выводы относительно ионных пучков интересны, но требуют экспериментального подтверждения.

2.2.2. Оценка возможных экспериментов

Была проанализирована возможность получения достоверных данных об оптимальном пучке с помощью различных возможных экспериментов. В целом такие эксперименты можно разделить на два типа. Первый связан с измерением выхода нейтронов из конвертеров. Распространенным критерием выбора материала для конвертера является множественность нейтронов, из чего можно сделать вывод, что предпочтительнее использовать тяжелые металлы [11]. Однако в работах [13, 24] мы показали, что выход нейтронов из конвертера не является подходящим параметром, поскольку он не определяет энергию, выделяемую в тепловыделяющей оболочке, окружающей конвертер. Подходящим параметром является полная кинетическая энергия E_{kin}, которую несут нейтроны, покидающие конвертер. E_{kin} коррелирует с энергией, выделяемой в активной зоне, независимо от типа частиц или материала конвертера. Это показано в таблице 3. Здесь приведены данные о выходе нейтронов и E_{kin} из конвертеров из LBE и Be, облученных протонами и ^{7}Li, а также соответствующие значения выделяемой энергии. Конвертеры представляют собой цилиндры радиусом 10 см и длиной 120 см. Геометрия активной зоны та же, но степень обогащения подобрана таким образом, чтобы обеспечить одинаковое значение k_{eff}.

Таблица 3. Выход нейтронов, суммарная энергия покинувших конвертер нейтронов E_{kin} и энергия, выделившаяся в глубине активной зоны с k_{eff} 0,988, при облучении протонами и ^{7}Li.

Particle/Energy, GeV/n	Converter material	Neutron yield			E_{kin}, MeV	E_{dep}, MeV
		total	E>10MeV	E>100MeV		
P 1	Be	3.06	1.32	0.64	202.1	1.971e5
	LBE	22.1	2.49	0.5	205.2	2.145e5
P1.5	Be	3.76	1.7	0.86	323	3.041e5
	LBE	33.66	4.24	0.9	349.6	3.543e5
^{7}Li 0.25	Be	8.75	3.58	1.12	292.5	3.05e5
^{7}Li 0.3	Be	11.01	4.72	1.76	442.9	3.933e5

Корректное сравнение различных пучков потребовало бы точных измерений спектров нейтронов под разными углами, интегрирования и расчета E_{kin}. Такой подход ограничен двумя аспектами. Один из них обусловлен важным вкладом нейтронов с энергией выше 100 МэВ в E_{kin}. Спектры покинувших конвертер нейтронов, образовавшихся при облучении ионами ^{7}Li с энергией 0,3 ГэВ/n Be-конвертера длиной 120 см и радиусом 10 см, и протонами с энергией 1,5 ГэВ Pb-конвертера тех же размеров, показаны на рис. 7. Следует отметить, что нейтроны с энергией E>100 МэВ вносят 70% вклада в E_{kin} в случае Be-конвертера и 53 % в случае Pb-конвертера.

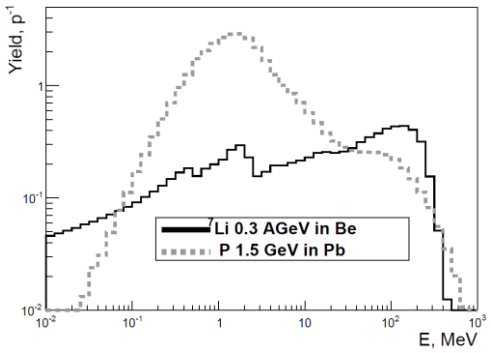

Рис. 7. Выход нейтронов из расширенного бериллиевого конвертера при облучении ^{7}Li с энергией 0,3 ГэВ/н, и из свинцового конвертера при облучении p с энергией 1,5 ГэВ. Размеры конвертеров: радиус 10 см, длина 120 см.

Расчет E_{kin} на основе измерений нейтронных спектров не дает надежных результатов, поскольку измерения, проведенные разными группами, для высокоэнергетической части нейтронных спектров, сильно различаются (в 2-4 раза) даже в случае измерений времени пролета (TOF) на тонких мишенях. Это утверждение проиллюстрировано на рис. 8, где сравниваются результаты, представленные в базе данных Exfor, для двойного дифференциального сечения рассеяния протонов с энергией 800 МэВ на бериллии (рис. 8a) [24, 25] и протонов с энергией 590 МэВ на уране (рис. 8b и 8c) [26, 27]. Количество нейтронов с энергией выше 10 МэВ различается в 2-4 раза. Во всех случаях использовался метод TOF.

Вторым ограничивающим фактором является необходимость измерения нейтронных спектров в протяженных конвертерах. Метод времени пролета не применим из-за неопределенности точки взаимодействия. Попытки измерить нейтронные спектры протонов, взаимодействующих с протяженными свинцовыми мишенями, были предприняты Сатурне [28]. Была использована сложная экспериментальная установка со сферическим бетонным экраном толщиной 2–3 м и каналами для детекторов, расположенными под разными углами. Измеренные спектры зависят от продольного

положения мишени относительно центра экспериментальной камеры, поэтому получить интегральные результаты сложно.

Использование различных пороговых реакций для определения характеристик спектра нейтронов также невозможно из-за крайне скудных экспериментальных данных о функциях возбуждения изотопов с пороговой энергией выше 100 МэВ.

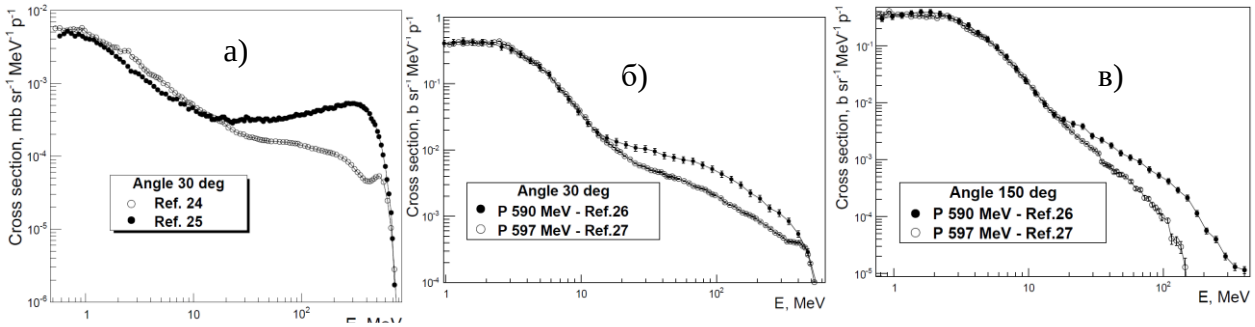

Рис. 8. Двойное дифференциальное сечение рассеяния нейтронов с энергией 800 МэВ в бериллии под углом 30° (а) и с энергией 590 МэВ в уране под углом 30° (б) и 150° (в).

Второе экспериментальное направление заключается в регистрации общего эффекта путем измерения процесса деления или распределения температуры. Измерения проводятся внутри протяженных мишеней, как в эксперименте FEAT в CERN [29] или в экспериментах с мишенью Quinta в LHEP, Дубна [30]. Такие эксперименты наиболее подходят для сравнения энергетической эффективности различных пучков при условии, что мишень имеет достаточно большие размеры, чтобы вместить в себя большую часть образующихся нейтронов. Следует избегать ограничения измерений только на поверхности преобразователя, поскольку это не позволяет корректно сравнивать пучки. Объяснение заключается в том, что когда требуется сравнить пучки с совершенно разными энергиями на нуклон, следует учитывать различия в пространственном распределении потоков частиц. С увеличением энергии на нуклон частиц пучка межъядерный каскад развивается на больших радиальных расстояниях, и измерения только на поверхности преобразователя приведут к завышению оценки деления, осуществляемого с помощью пучка ионов низкой энергии, по сравнению с пучком протонов с энергией 1-2 ГэВ. В качестве аргумента соотношение между числом делений, реализованных при облучении ^{7}Li с энергией 0,3 ГэВ/н и протонами 1,5 ГэВ, полученное путем интегрирования данных, зарегистрированных на поверхности преобразователя, сравнивается с соотношением, полученным в свинцовой мишени LETASUR и в подкритическом реакторе, которые приведены в таблице 4. Как видно, измерения только на поверхности конвертера приводят к ложно заниженным значениям, регистрируемым при использовании пучков протонов.

Таблица 4. Соотношение между интегральным числом делений, полученных при использовании ^{7}Li 0,3 ГэВ (конвертер Be), и протонами 1,5 ГэВ (конвертер Pb).

Nfis-Li/Nfis-P	Detectors natural U	Detectors enriched U (10% U235)
Only converter	2.69	2.4
LETASUR	1.28	1.31
ADSR	1.17	

2.2.3. Конструкция протяженной мишени

Конструкция мишени должна в первую очередь удовлетворять двум условиям: обеспечивать корректное сравнение различных пучков и позволять получать спектры нейтронов, максимально приближенные к спектрам, получаемым в ADSR с охлаждением с помощью LBE.

Размеры мишени должны быть достаточно большими, чтобы уменьшить утечку и обеспечить взаимодействие более 99 % пучка внутри мишени. Были изучены различные варианты геометрии [13, 31]. На рисунке 9 представлен параллелепипед размером 80 x 150 см, окружённый стальным экраном толщиной 10 см. В мишени имеется центральное отверстие радиусом 10 см и длиной 120 см для размещения конвертера. Внутри центрального канала расположены цилиндрические конвертеры длиной 110 см из различных материалов, образующие окно для пучка длиной 10 см. Горизонтальные и вертикальные отверстия радиусом 2 см расположены на расстоянии 4 радиусов (15, 20, 25 и 30 см) друг от друга для размещения детекторов. В качестве материала для мишени рассматривались свинец, графит и природный уран. Были проанализированы варианты с топливными стержнями и без них. В варианте с топливными стержнями в мишень вставляются металлические стержни (U-10%Zr) радиусом 1 см, как показано на рисунке 9б.

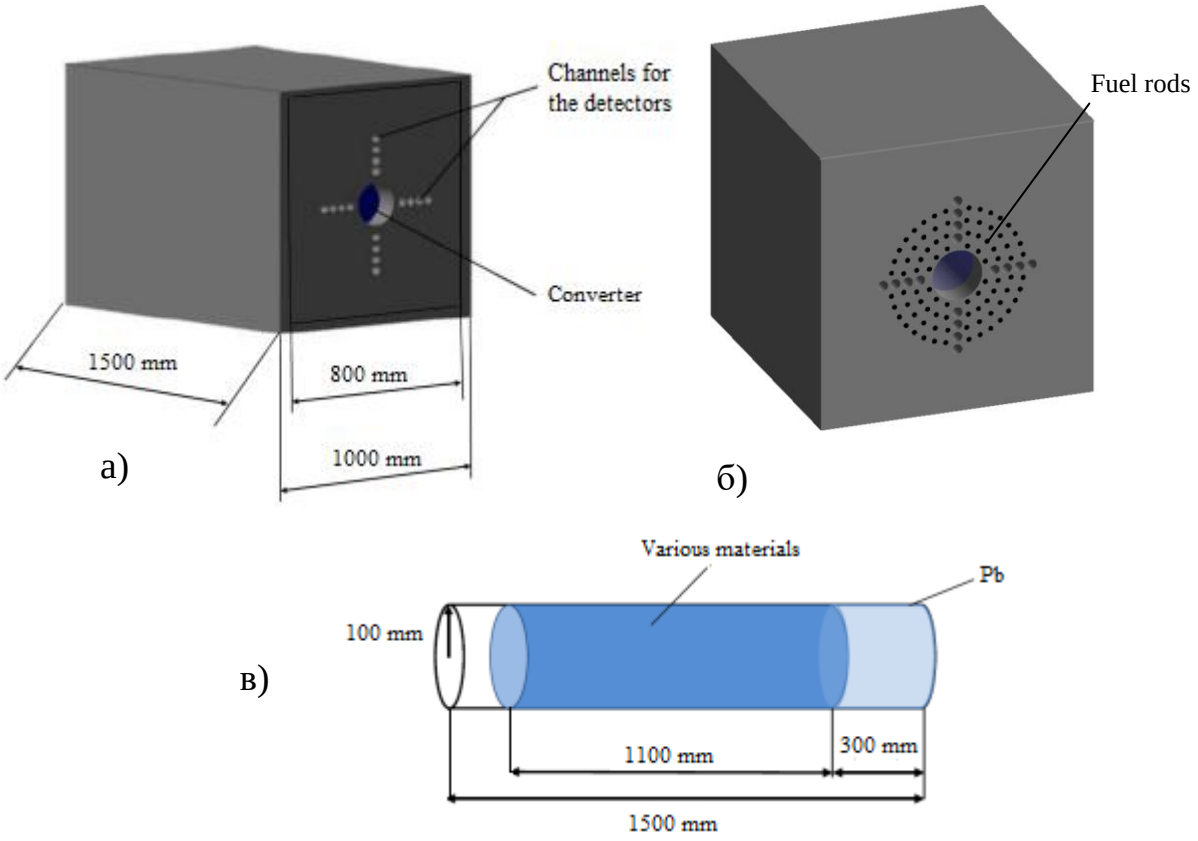

Рис. 9. Схема мишени без тепловыделяющих элементов (а), с тепловыделяющими элементами (б) и конвертера (в).

Поскольку конструкция мишени должна воспроизводить ситуацию в реальной установке для исследования свойств делящихся материалов, в качестве мишени с топливными стержнями, вставленными в свинец вместо теплоносителя LBE, был выбран первый вариант. Еще один аспект, который необходимо учитывать, — это то, что использование конвертеров из разных материалов изменяет форму спектра нейтронов и, следовательно, эффективный коэффициент размножения нейтронов [13, 14], но для корректного сравнения различных пучков необходимо измерить распределение продуктов

деления в мишени с одинаковым эффективным коэффициентом размножения нейтронов. Поскольку самый высокий k_{eff} достигается при использовании конвертера из бериллия, поправка на k_{eff} рассчитывается следующим образом: конвертеры из других материалов, кроме бериллия, имеют комбинированную структуру: внутренний цилиндр из исследуемого материала окружен слоем полиэтилена. Необходимая толщина внешнего слоя полиэтилена определяется с помощью моделирования.

Изготовление такой мишени — дорогостоящий процесс, требующий получения необходимых разрешений, поэтому мы также проанализировали упрощенный вариант мишени без топливных стержней. Спектры нейтронов, полученные с помощью моделирования в Geant4 для различных конструктивных вариантов мишени, показаны на рисунке 10. Мишень облучалась пучком ^{7}Li с энергией 0,3 ГэВ/н, взаимодействующим с конвертером из бериллия.

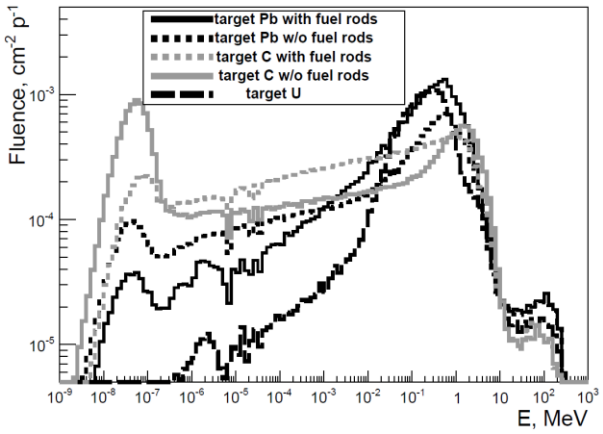

Рис. 10. Средние спектры нейтронов в детекторах при различных конфигурациях мишени.

В свинцовой мишени без тепловыделяющих элементов спектр нейтронов мягче, чем в присутствии тепловыделяющих элементов. Влияние различных форм спектра нейтронов на способность к размножению показано в таблице 5 на примере соотношения захвата нейтронов ^{238}U и деления ^{239}Pu. Это соотношение будет использоваться в экспериментах для оценки способности нейтронов к размножению. При удалении тепловыделяющих элементов из свинцовой мишени спектр нейтронов становится мягче, а коэффициент размножения уменьшается на 20 %.

Таблица 5. Соотношение capt^{238}U/fis^{239}Pu для различных форм спектра нейтронов

	Pb target with fuel rods	Pb target without fuel rods	Graphite target with fuel rods	Graphite target without fuel rods	^{nat}U target
Capt^{238}U/Fis^{239}Pu	0.09	0.074	0.062	0.014	0.116

Графитовая мишень с топливными стержнями также может использоваться для оценки эффективности различных пучков [13]. В такой мишени из-за более мягкого спектра нейтронов коэффициент размножения на 30 % ниже, чем в свинцовой мишени. Но если извлечь топливные стержни из графитовой мишени, спектр нейтронов станет очень мягким, близким к спектру в тепловых реакторах, и коэффициент размножения снизится в 6 раз. Таким образом, графитовая мишень без топливных стержней не подходит для наших экспериментов [32].

С другой стороны, мишень из свинца без топливных стержней позволяет корректно воспроизвести соотношение между количеством делений, полученных при использовании пучков с разной энергией, характерное для ADSR с LBE теплоносителем. У мишени без топливных стержней есть и другое преимущество: плотность потока частиц в каналах для

детекторов выше, чем в варианте с топливными стержнями. Это упрощает измерения на большом радиусе и является важным фактором при планировании эксперимента, поскольку можно рассчитывать на интенсивность пучка порядка 10^8 ч/с. Сравнение распределения делений, зарегистрированных в свинцовой мишени с топливными стержнями и без них, представлено на рисунке 11а. Данные были получены с помощью моделирования в программе Geant4 для пучка ^{7}Li с энергией 0,3 ГэВ/н, взаимодействующего с бериллиевым конвертером. Показанные значения соответствуют образцам металлического урана с обогащением по ^{235}U на 10 %. Интегральные значения делений, полученные при использовании пучков ^{7}Li с энергией 0,3 ГэВ/н и протонов с энергией 1,5 ГэВ в свинцовых и урановых мишенях, приведены в таблице 6. Для ^{7}Li использовался бериллиевый конвертер, а для протонов комбинированный свинцово-полиэтиленовый конвертер. Показаны значения делений, зарегистрированные в образцах природного и обогащенного урана.

Когда в качестве мишени используется не свинец, а природный уран, нейтронные спектры становятся более жесткими, но соотношение интегральных значений деления остается таким же, как при использовании в ADSR. Основной недостаток урановой мишени заключается в более низком нейтронном потоке с более быстрым радиальным уменьшением, вызванным поглощением нейтронов в материале мишени. Это затрудняет измерение скорости деления на больших радиусах. Различия в распределении продуктов деления в свинцовой и урановой мишенях показаны на рисунке 11б.

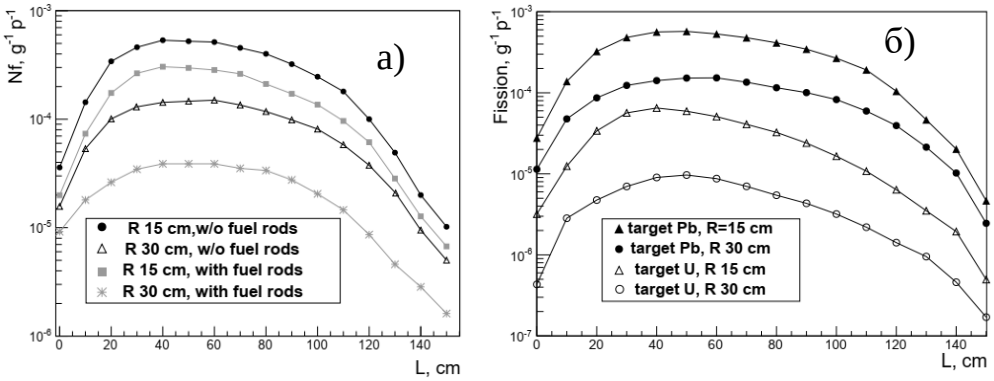

Рис. 11. Распределение деления на радиусах 15 и 30 см в свинцовой мишени с топливными стержнями и без них (а), а также в свинцовой мишени и мишени из природного урана (б), облученных ^{7}Li с энергией 0,3 ГэВ/н и конвертером Be.

Таблица 6. Суммарное число делений на одну падающую частицу, зарегистрированное на образцах природного и обогащенного урана.

Beam/Energy, GeV/n	Pb target with fuel rods		Pb target w/o fuel rods		^{nat}U target	
	^{nat}U	Enriched U	^{nat}U	Enriched U	^{nat}U	Enriched U
^{7}Li / 0.3	72.4	524.7	110.3	1055.9	24.8	88.4
P / 1.5	74.1	517.9	105.2	1014.8	21.5	83.1

Представленные выше результаты оправдывают выбор свинца в качестве материала для мишени LETASUR (Lead Target for the study of Accelerator driven SUbcritical Reactors — свинцовая мишень для изучения сверхкритических реакторов с ускорительным приводом). Каналы для детекторов проходят по всей длине мишени. Их механическая прочность обеспечивается за счет использования цилиндров из нержавеющей стали толщиной 1 мм. Детекторы размещены на поверхности алюминиевых пластин длиной 120 см и толщиной 2 мм, которые горизонтально вставлены в каждое отверстие. Чтобы обеспечить корректное сравнение пучков ионов с разной массой и энергией на нуклон, при проектировании мишени необходимо учитывать некоторые

аспекты. Один из них связан с разницей в длине пробега частиц, особенно при использовании материалов с низким атомным номером, таких как бериллий, в качестве конвертеров. Ионы с низкой энергией останавливаются внутри конвертера, а протоны с энергией 1,5–2 ГэВ — нет. Для протонов необходимо предусмотреть дополнительный слой свинца за конвертером. Чтобы минимизировать общую длину мишени, мы не будем останавливать пучок протонов, а добьемся того, чтобы более 99 % пучка взаимодействовало с мишенью. Проведенное моделирование показало, что нам нужен дополнительный слой свинца длиной не менее 30 см, в результате чего общая длина мишени составит 150 см. Вид мишени в разрезе представлен на рисунке 12.

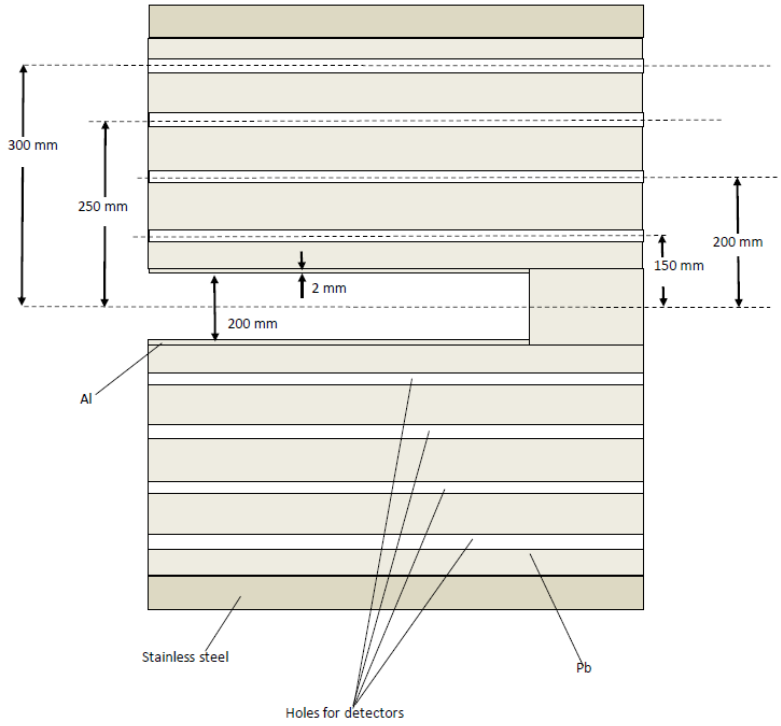

Рис. 12. Разрез мишени LETASUR.

Другой аспект связан с необходимостью компенсировать различия в целевом значении k_{eff}, обусловленные использованием разных конвертеров. Наиболее выраженный «хвост» в спектре нейтронов в сторону тепловых энергий и максимальное значение k_{eff} достигаются при использовании конвертера из бериллия. При тестировании других материалов необходимо сконструировать комбинированный конвертер с центральным цилиндром из исследуемого материала, окруженным внешним слоем из материала с хорошей способностью замедлять нейтроны, например, бериллия или полиэтилена, до достижения общего радиуса 10 см. Например, для комбинации Pb+Be радиус свинцового цилиндра составляет 4,5 см и 9,3 см для комбинации Pb+полиэтилен. Влияние предложенного метода на спектры нейтронов показано на рисунке 13.

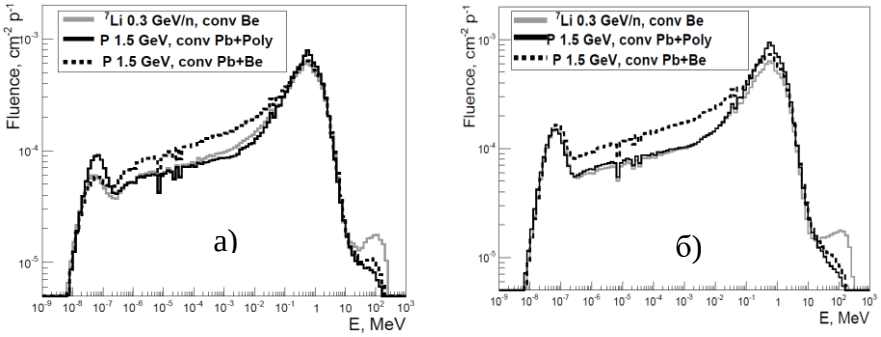

Рис. 13. Средние спектры нейтронов для ^{7}Li при энергии 0,3 ГэВ/н с использованием конвертера из бериллия и при энергии 1,5 ГэВ с использованием комбинированных конвертеров, рассчитанные с помощью Geant4 (а) и MCNP (б).

Ожидаемые результаты по мишени LETASUR были изучены путем сравнения прогнозов, полученных с помощью кодов Geant4 и MCNPX.

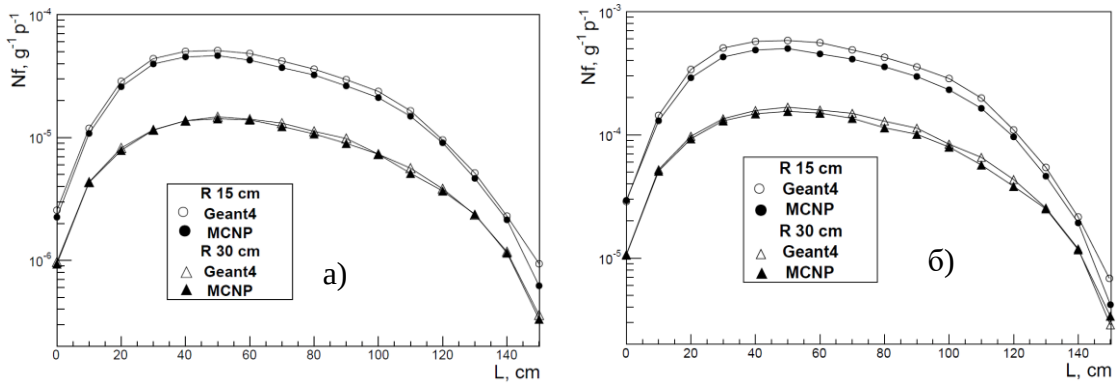

Рис. 14. Продольное распределение деления в мишени с конвертером из бериллия, облученной ^{7}Li с энергией 0,3 ГэВ/н, зарегистрированное в образцах природного урана (а) и обогащенного урана (б).

Некоторые примеры распределений числа делений представлены на рисунках 14 и 15. На рисунке 14 показаны продольные распределения числа делений на расстояниях 15 и 30 см, соответствующие ситуации, когда пучок ^{7}Li с энергией 0,3 ГэВ/н взаимодействует с Be-конвертером. На рисунке 14а показано число делений, зарегистрированных в образцах природного урана, а на рисунке 14б — в образцах обогащённого урана (10 % ^{235}U). На рисунке 15 представлены аналогичные распределения, соответствующие взаимодействию протонов с энергией 1,5 ГэВ в комбинированном Pb+Be конвертере. Сравнение некоторых интегральных значений, полученных для различных комбинаций пучка и конвертера, приведено в таблице 7. Можно отметить хорошее совпадение результатов, полученных с помощью Geant4 и MCNPX.

Таблица 7. Общее количество делений на снаряд в LETASUR с различными конвертерами

Part/E, GeV/n	Code	Conv. Be		Conv. Pb+Be		Conv. Pb+Poly	
		Nat U	10%^{235}U	Nat U	10%^{235}U	Nat U	10%^{235}U
P 1	Geant4	48.6	433	65.8	550.4	62.1	601.5
	MCNP	65.2	585.6	73.2	677.8	68.2	608
P 1.5	Geant4	74.9	661	97.1	998.1	105.2	1014.8
	MCNP	94.7	857.2	109.4	1101.7	105.2	997.4
^{7}Li 0.2	Geant4	43.5	389.9	15.5	145.8	15.1	139.8
	MCNP	42.7	387.3	13.6	122.5	13.4	115.9
^{7}Li 0.25	Geant4	79.1	760	24.9	220.3	26.8	249.7
	MCNP	70.5	639.3	24	216.2	24.2	205.4
^{7}Li 0.3	Geant4	110.3	1055.9	39.2	368.5	42	394.2
	MCNP	103.7	936.5	30.8	344.6	37.4	325.4

Проект преследует две основные цели. Первая - определить оптимальную комбинацию конвертеров пучка для ADSR. Мы предлагаем простой подход, который позволяет получить необходимый результат с учетом интенсивности пучка, доступной на установке NICA. Результат получается путем интегрирования распределения делений по объему мишени и сравнения общего количества делений на одну частицу пучка. Вторая цель - проанализировать влияние нейтронных спектров различной формы на коэффициент размножения и найти оптимальную форму нейтронного спектра для ADSR.

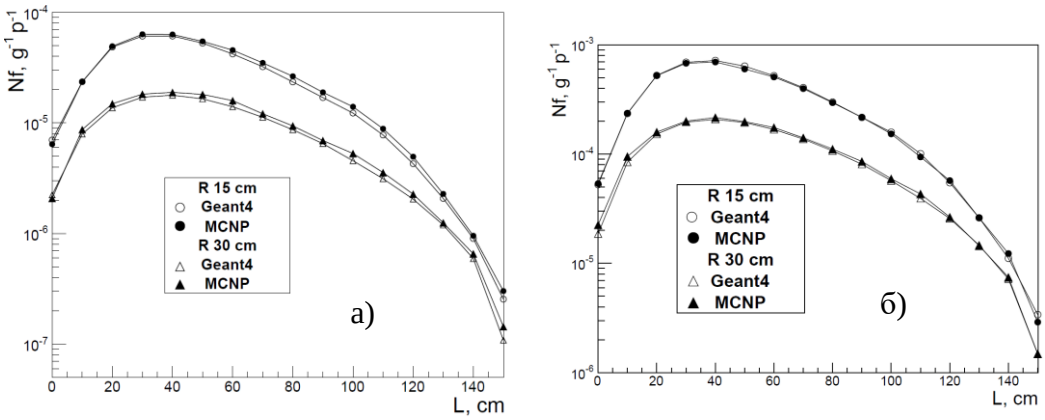

Рис. 15. Продольные распределения деления в мишени с комбинированным конвертером Pb+Be, облученной при энергии 1,5 ГэВ, зарегистрированные в образцах природного (а) и обогащенного (б) урана.

2.2.4. Планирование эксперимента

Эксперименты будут проводиться на канале СИЯЭТ в ЛФВЭ. Мишень облучается в течение ~10 часов для каждой комбинации пучок-конвертер импульсными узкими пучками с максимальной интенсивностью, обеспечиваемой ускорителем Нуклотрон (~10^9 частиц на импульс, 10-12 секунды между импульсами), выведенными в медленном режиме. Наиболее важным параметром пучка для наших экспериментов является интегральная интенсивность пучка, которая должна быть определена с точностью лучше 5 %. Интенсивность пучка измеряется с помощью ионизационной камеры с параллельными пластинами (ИК), откалиброванной с помощью тонких пластиковых сцинтилляторов. Неравномерность сигнала по всей активной площади камеры должна быть ниже 3 %. Профиль пучка не является критическим параметром, мы должны поддерживать вертикальные и горизонтальные отклонения пучка относительно центра мишени в пределах 10 мм. Для измерения интенсивности и профиля пучка могут использоваться стриповые ионизационные камеры, однако равномерность сигнала и точность измерения в них будут хуже, чем в простой ИК. Предпочтительно измерять интенсивность пучка с помощью простой ионизационной камеры с параллельными пластинами, а профиль пучка — с помощью двуполосного кремниевого детектора [33]. Схема эксперимента показана на рисунке 16. Пластиковый сцинтиллятор P1 используется для получения калибровочных коэффициентов ионизационной камеры при низкой интенсивности пучка. При высокой интенсивности пучка P1 выводится из пучка и заменяется профилометром. Линейность сигнала ИК проверяется во время облучения с помощью сцинтиллятора P2. Таким образом обеспечивается погрешность менее 5 % для интегральной интенсивности пучка.

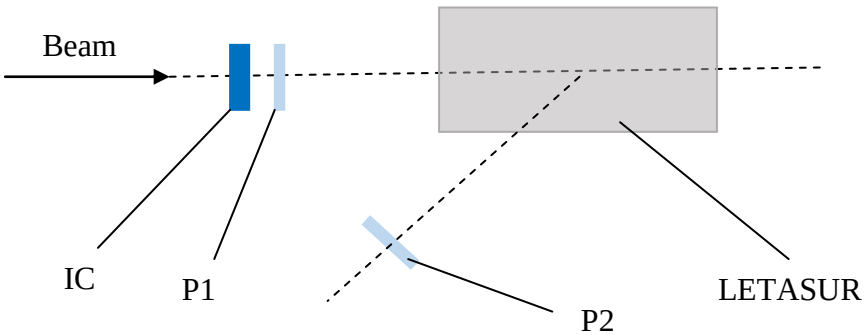

Рис. 16. Экспериментальная установка.

Будут исследованы пучки протонов и ионов. Для получения эталонных данных будет проведен анализ пучков протонов в диапазоне энергий от 0,5 до 2 ГэВ. В случае с пучками ионов интересующий нас диапазон энергий составляет 0,25–0,75 ГэВ/н. Максимальная энергия, выбранная для пучков ионов, обусловлена двумя причинами. С одной стороны, это энергия, которую можно получить на линейном ускорителе той же длины, что и для протонов с энергией 1,5 ГэВ. При более высоких энергиях значения G не демонстрируют значительного роста, который оправдывал бы выбор ускорителя большей длины. С другой стороны, энергия ионов и интенсивность пучка ограничены возможностями охлаждения реактора. Может возникнуть вопрос, не может ли быть полезной высокая энергия, высвобождаемая при ускорении ^{12}C, ^{16}O, ^{20}Ne до энергий выше 0,75 ГэВ/н, что позволило бы снизить интенсивность пучка, необходимую для получения требуемой мощности. На самом деле такой подход невыгоден, поскольку снижение интенсивности приводит к уменьшению эффективности, как видно из рисунка 17. Здесь сравниваются зависимости G от интенсивности пучка для пучков протонов с энергией 1,5 ГэВ, ^{7}Li с энергией 0,3 ГэВ/н и ^{12}C с энергией 1 ГэВ/н. За эталонную частицу принят протон с энергией 2 ГэВ и интенсивностью пучка $1{,}5\cdot10^{16}$ ч/с, а эффективность ускорителя составляет 0,2. Данные получены в активной зоне с k_{eff} 0,985. Для каждой кривой показаны максимально допустимые значения интенсивности пучка, соответствующие суммарной электрической мощности 1 ГВт. Максимальная интенсивность пучка, которую можно использовать при ускорении ^{12}C до энергии 1 ГэВ/н, дает значение G~27. При ускорении ^{7}Li до энергии 0,3 ГэВ/н можно достичь значения G~38 [31].

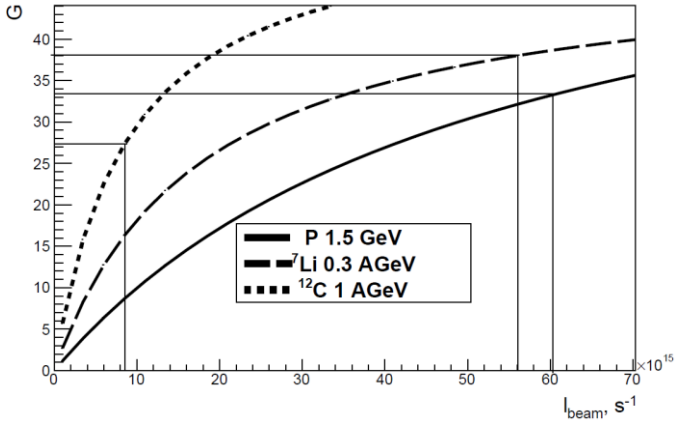

Рис. 17. Зависимость G от интенсивности пучка в активной зоне с k_{eff} 0,985.

Эксперименты, проведенные с мишенью LETASUR, позволяют воспроизвести соотношение между количеством делений (выделяемой энергией) для различных комбинаций конвертеров пучка, рассчитанное для реальной установки ADSR. В частности, можно продемонстрировать эквивалентность ^{7}Li 0,25 (0,3) ГэВ/н и P 1 (1,5) ГэВ [31].

Для измерения распределения делений рассматриваются два метода: определение скорости накопления продуктов деления в образцах обогащенного урана, измерение гамма-активности с помощью гамма-спектрометров с высокочистым германием или регистрация продуктов деления с помощью ионизационных камер. В первом варианте используются образцы из сплава U-10%Zr (10%U235) с радиусом 5 мм и толщиной 1 мм. Измеренные скорости накопления вместе с данными о суммарном выходе изотопов будут использованы для расчета усредненного значения скорости деления для каждого образца. Была выбрана группа из пяти изотопов с высоким суммарным выходом при делении и периодом полураспада от 16,7 до 193 часов: ^{97}Zr, ^{132}Te, ^{131}I, ^{133}I, ^{143}Ce. Все они имеют подходящие цепочки распада, а время жизни предшественников достаточно мало, чтобы можно было использовать кумулятивный выход деления [31].

Второй вариант представляет собой небольшие ионизационные камеры деления, расположенные внутри каждого канала с шагом 20 см. Будут использоваться герметичные камеры с делящимся покрытием из обогащенного урана (10% U235), работающие в импульсном режиме.

Другое направление экспериментальных исследований будет посвящено изучению возможностей трансмутации в подкритических реакторах [31]. В ADSR количество актинидов, сжигаемых в течение цикла, напрямую связано с продолжительностью цикла и зависит от способности реактора к воспроизводству. Спектр жестких нейтронов, полученный в FR, обеспечивает более высокий коэффициент размножения, чем в тепловых реакторах. Однако моделирование показывает, что нейтронные спектры промежуточной формы обеспечивают более высокий коэффициент размножения, чем в FR. Экспериментально характеристика нейтронных спектров, характеризующая размножение, будет оцениваться через отношение захвата нейтронов в ^{238}U к расщеплению в ^{239}Pu. Одной из возможностей изменения формы нейтронных спектров является использование преобразователей из различных материалов. Другая возможность заключается в экранировании образцов материалами, содержащими B с различным содержанием ^{10}B. Некоторые примеры имитированных спектров нейтронов, зарегистрированных на радиусе 15 см и длине 50 см, с пучком ^{7}Li 0,3 ГэВ/н, взаимодействующих в преобразователях Be и Pb, представлены на рис. 18. В случае Be-конвертера, помимо спектра нейтронов, зарегистрированного в неэкранированном образце, показаны спектры в образцах, экранированных природным бором и бором, обогащенным на 90% ^{10}B. Расчётные коэффициенты размножения, полученные с использованием спектров, представленных на рисунке, приведены в таблице 8.

Таблица 8. Соотношение capt238U/fis239Pu для различных форм нейтронного спектра

	Conv Be unshield	Conv Be shield ^{nat}B	Conv Be shield 90 % ^{10}B	Conv Pb unshield
Capt^{238}U/Fis^{239}Pu	0.063	0.524	0.31	0.227

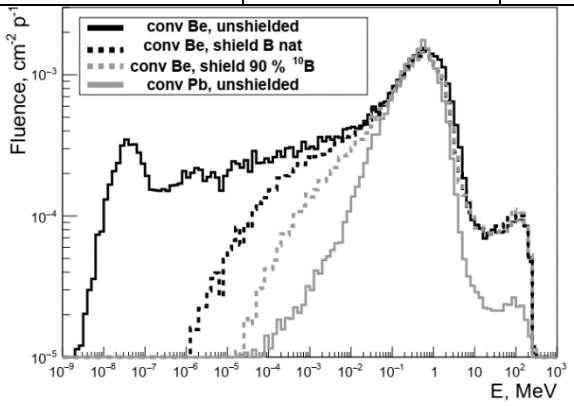

Рис. 18. Различные формы спектра нейтронов.

Наборы тонких пленок из Au, Mo, W, Ni, Co и Bi будут подвергнуты облучению в тех же условиях, что и образцы с ^{238}U и ^{239}Pu. Для низкоэнергетической части спектра нейтронов будут использованы следующие реакции радиационного захвата: ^{197}Au(n,γ)^{198}Au, ^{98}Mo(n,γ)^{99}Mo, ^{186}W(n,γ)^{187}W, ^{59}Co(n,γ)^{60}Co. Эти реакции обычно используются для измерения спектра нейтронов в ядерных реакторах. Высокоэнергетическая часть спектра нейтронов будет исследована путем измерения скорости накопления изотопов с различными пороговыми энергиями в образцах из кобальта и висмута.

Эксперименты будут проводиться в экспериментальной комнате СИЯЭТ на ЛФВЭ. Экранирование экспериментальной комнаты выполнено бетонными стенами высотой 3 м и бетонной крышей толщиной 1 м. При использовании данной защиты были проанализированы условия безопасного проведения экспериментов в отношении радиационного облучения. Была проведена серия расчетов для определения максимально допустимой интенсивности излучения. Схематическое изображение геометрии, включая места, где были зарегистрированы дозы облучения, приведено на рисунке 19.

Было проанализировано воздействие радиации на персонал во время экспериментов с учетом зон, в которых необходимо присутствие работников во время облучения мишени. Экспериментальные зоны СИМБО, ИСКРА, СИЯЭТ и канал пучка в здании 205 будут объявлены запретными зонами на время облучения. Все эти зоны со всех сторон, включая крышу, имеют бетонную защиту.

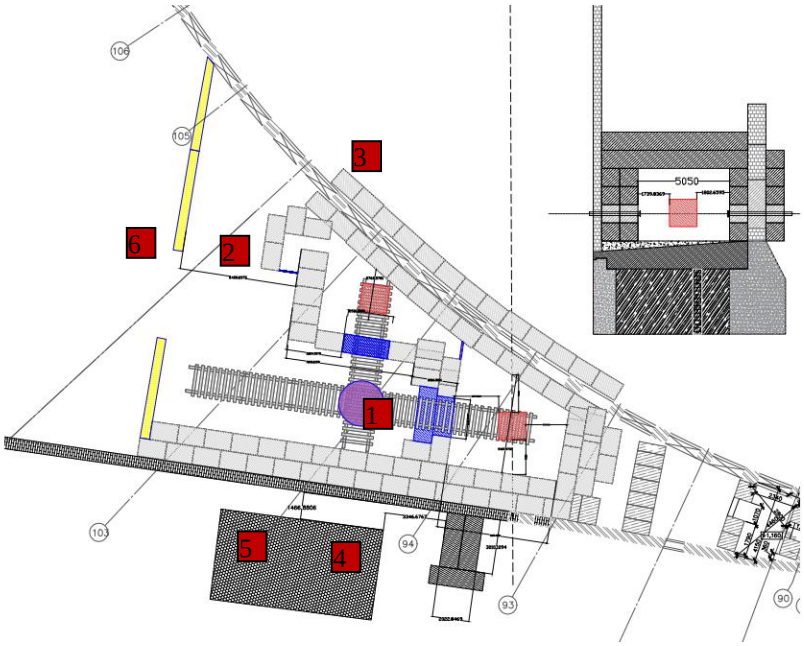

Рис. 19 Схема экспериментальной комнаты.

Зоны за пределами этих участков должны обеспечивать возможность присутствия персонала и быть объявлены контролируемыми зонами. Зоны, отмеченные детекторами 2 и 3, должны обеспечивать возможность временного присутствия персонала группы А. Дозы облучения в диспетчерской СИЯЭТ (детекторы 4 и 5) должны быть достаточно низкими, чтобы обеспечить постоянное присутствие персонала группы А. За пределами здания (детектор 6) дозы облучения должны соответствовать уровню для персонала группы Б. Максимальные дозы, указанные в российском нормативе (ОСПОРБ-99/2010), следующие:

- 12 мкЗв/ч для зон с временным пребыванием персонала группы А
- 6 мкЗв/ч для зон с постоянным пребыванием персонала группы А
- 1,2 мкЗв/ч для персонала группы Б
- 0,06 мкЗв/ч для населения

Дозы для пучка ^{12}C с энергией 0,75 ГэВ/н, взаимодействующего с Be-конвертером, и P с энергией 2 ГэВ, взаимодействующего с комбинированным Pb+Poly-конвертером, рассчитанные на одну падающую частицу и соответствующие интенсивности пучка $1 \cdot 10^9$ ч/с, приведены в таблице 9. Результаты показывают, что интенсивность пучка $1 \cdot 10^9$ ч/с

может использоваться для всех комбинаций пучок – конвертер. Ионы с меньшей массой, чем у ^{12}C, позволят увеличить интенсивность пучка.

Таблица 9. Дозы, зарегистрированные при облучении мишени LETASUR ^{12}C с энергией 0,75 ГэВ/н и P с энергией 2 ГэВ при интенсивности пучка $1 \cdot 10^9$ ч/с.

Детектор	^{12}C 0.75 ГэВ/н		P 2 ГэВ	
	Sv/p	μSv/h	Sv/p	μSv/h
1	2.03e-17	73	2.3e-17	81.8
2	6.2e-20	0.22	6.1e-20	0.22
3	3.5e-20	0.13	5.4e-20	0.19
4	2.6e-19	0.93	7.3e-20	0.26
5	9e-20	0.32	4.5e-20	0.16
6	5.2e-19	0.93	5.3e-19	0.96

Еще одним исследуемым аспектом была активация мишени и безопасное нахождение персонала вблизи мишени после облучения. На рисунке 20 показана динамика доз нейтронов и гамма-излучения в конце облучения, зарегистрированная вблизи мишени. Предполагалось использование пучка ^{12}C с энергией 0,75 ГэВ/н и интенсивностью $1 \cdot 10^9$ ч/с. Через 15 минут после облучения доза падает ниже 1 мкЗв/ч.

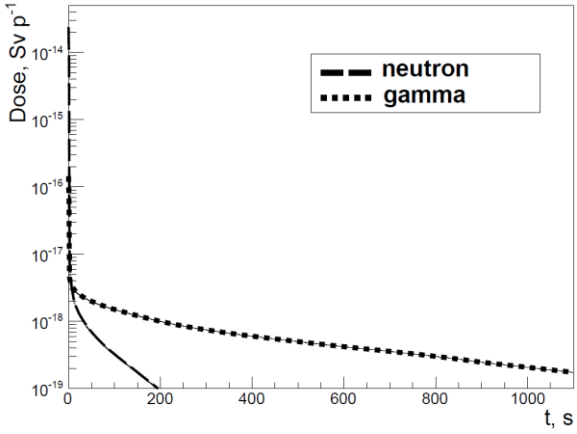

Рис. 20. Изменение нейтронной и гамма-доз после облучения мишени ^{12}C с энергией 0,75 ГэВ/н и интенсивностью $1 \cdot 10^9$ ч/с.

Мы пришли к выводу, что можем безопасно использовать интенсивность пучка около $1 \cdot 10^8$ ч/с.

Риск для проекта связан с возможной неспособностью ускорителя обеспечить необходимую интенсивность пучка.

Список литературы:

1. Орлов В. В. и др., Закрытый топливный цикл реакторов БРЕСТ на площадке, Прогр. Nucl. En. 47 1-4 (2005) с. 171-177

2. Хашим М., Цао Л., Чжоу С., Ма Р., Шао Ю., Чен Р., SPARK-NC: малый модульный быстрый реактор с висмут-свинцовым теплоносителем, естественной циркуляцией и возможностью поддержания нагрузки, Energies 13 (2020) 5410; doi:10.3390/en13205410

3. К. М. Ван Атта, «Краткая история проекта MTA», Информационное совещание ERDA по ускорительному размножению, 19–29 января (1977).

4. Г. А. Бартоломью и П. Р. Танниклифф, ред., «Исследование AECL по созданию генератора интенсивных нейтронов», Atomic Energy of Canada Limited, отчёт № AECL-2600 (1966).

5. Р. Г. Васильков, В. Л. Гольдманский и др., «Атомная энергия», 48, 329 (1978).

6. К. Д. Боуман и др., «Производство ядерной энергии и трансмутация отходов с использованием источника интенсивных тепловых нейтронов на основе ускорителя», LA-UR-91-2601.

7. К. Руббиа и др., «Усилитель энергии для более чистого и неисчерпаемого производства ядерной энергии на основе ускорителя пучков частиц», CERN/AT/93-47 (1993).

8. С. Тосинобу, «Исследовательская деятельность по созданию системы трансмутации на основе ускорителя в Японском агентстве по атомной энергии», Prog. Nucl. Energy 47, 314–326 (2005).

9. Ц. Чжао, Ц. Чэнь и Х. Чэнь, «Предварительная оптимизация энергии протонов и мишени для свинцово-висмутовой эвтектической мишени демонстрационного ADS-реактора», Prog. Nucl. Energy 71, 117–121 (2014).

10. Ф. Фиори и Ц. Чжоу, «Исследование возможностей развития атомной энергетики в Китае и роли ADS-реактора в развитии атомной энергетики в Китае», Prog. Nucl. Energy 91, 159–169 (2016).

11. С. Р. Хашеми-Нежад, В. Вестмайер, М. Замани Валасиаду, Б. Томауске и Р. Брандт, «Оптимальный ионный пучок, тип и размер мишени для систем с ускорителями: влияние на мощность ускорителя», Ann. Nucl. Energy 38, 1144–1155 (2011).

12. Кошкарёв Д. Г., Соболевский Н. М., Бархударян А. В., «Применение электронно-ядерного метода в производстве электроэнергии», At. Energy V.105, 225-229 (2008).

13. М. Параипан, И. А. Крячко, В. М. Джавадова, Е. А. Левтерова, С. И. Тютюнников, «Основные результаты нейтронно-физического исследования адсорбционных систем с ионными пучками и их значение для планирования экспериментов», Phys. Часть. Nucl. Lett. 19 2, 129-144 (2022).

14. М. Параипан, В. М. Джавадова, С. И. Тютюнников, «Влияние пучка частиц и типа ускорителя на эффективность ADS», Nucl. Sci. Eng., 198 1, 109-120 (2024).

15. М. Параипан, В. М. Джавадова, С. И. Тютюнников, «Аспекты оптимизации мишени для ADS с использованием пучков легких ионов при энергиях ниже 0,5 AGeV», Progr. Nucl. En. 120 103221 (2020)

16. Отчет о техническом проектировании ESS от 23 апреля, ESS-doc-274 (2013)

17. Д. Киселёв и др., Состояние и перспективные проекты высокоинтенсивного протонного ускорителя PSI, JPS Conf. Proc., 33, 011004 (2021)

18. Entler S., Horacek J., Dlouhy T., Doctal V., Приближенное моделирование экономики термоядерной энергетики, Energy 152 (2018) 489-497

19. Meier W.R. et al., Технологические аспекты лазерного инерционного термоядерного синтеза (LIFE), Fusion Engineering and Design 89 (2014) 2489-2492

20. М. Окамура и др., Демонстрация создания интенсивного литиевого пучка для генерации импульсных нейтронов, Sci. Rep., 12, 14016 (2022)

21. А. Ахмад, Б. А. Линдли, Дж. Т. Паркс, «Переходные процессы, вызванные ускорителем, в подкритических реакторах с ускорителем», Nucl. Instr. Метамфетамин. A 696, 55 (2012)

22. М. Параипан, А. А. Балдин, Е. Г. Балдина, С. И. Тютюнников, «Оптимизация пучка и мишени для получения энергии в системах с ускорителями», EPJ Web of Conferences 204, 04001 (2019); https://doi.org.10.1051/epjconf/201920404001

23. М. Параипан, О. В. Белов, В. М. Джавадова, Т. Н. Тран, «Влияние типа топлива и интенсивности пучка на характеристики ADSR», NURER 2026, 10-12 Сентября, Алмату, Казахстан

24. У. Б. Амиан и др., «Дифференциальные сечения образования нейтронов при взаимодействии с протонами с энергией 800 МэВ», Nucl. Sci. Eng., 112, 78 (1992).

25. Д. А. Линд, «Исследования зарядового обмена в Лос-Аламосской лаборатории физики мезонов», Canadian Journal of Physics, 65, 637, (1987).

26. Д. Фильгес и др., «Валидация модели внутриядерного каскадного испарения для образования частиц», Kernforschungszentrum Karlsruhe Reports, № 3779, стр. 11 (1984).

27. У. Б. Амиан и др., «Дифференциальные сечения образования нейтронов при взаимодействии с протонами с энергией 597 МэВ», Nucl. Sci. Eng., 115, 1, (1993).

28. Д. К. Дэвид и др., «Образование расщепляющих нейтронов на толстой мишени в установке Saturne», Семинар по ядерным данным для трансмутации ядерных отходов: ядерная наука и технологии на службе человечества. Материалы семинара, 1–5 сентября 2003 г., Дармштадт, Германия

29. Х. Калеро и др., «Экспериментальные измерения температуры для проверки усилителя энергии», Nucl. Instr. Метамфетамин. Phys. Res. A, 376, 89, (1996).

30. М. Ю. Артиушенко и др., «Исследование пространственного и энергетического распределения нейтронов в массивной урановой мишени, облучаемой дейтронами с энергией 1…8 ГэВ», Prob. Atomic Sci.Technol., 6, 88, 170, (2013).

31. М. Параипан и др., «Расширенная свинцовая мишень для изучения перспектив создания подкритического реактора с ускорительным приводом», Nucl. Sci. Eng., 1, 1-13 (2025) https://doi.org/10.1080/00295639.2025.2522570.

32. М. Параипан и др., «Экспериментальный подход к изучению энергоэффективности различных пучков в подкритических реакторах», ISINN 2026, Дубна, Россия

33. Ю. А. Топко, С. В. Хабаров, Н. И. Замятин, Б. Л. Топко, О. Г. Тарасов, Е. В. Зубарев, Ю. А. Копылов, Е. А. Стрелецкая, "Разработка кремниевого трекера пучка и профилометра пучка для эксперимента БМ@Н", ЭЧАЯ, т. 53, ст. 398–402 (2022).

2.3. Предполагаемый срок выполнения: 2028-2032

2.4. Участвующие лаборатории ОИЯИ: ВБЛФВЭ, ДЛЯП, ФЛНФ

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	0	0	0	0	0
Tier 1 (ядро-час)	0	0	0	0	0
Tier 2 (ядро-час)	0	0	0	0	0
СК «Говорун» (ядро-час) - CPU - GPU	0	0	0	0	0
Облака (CPU ядер)	0	0	0	0	0

2.5. Участвующие страны, научные и научно-образовательные организации

Организация	**Страна**	**Город**	**Участники**	**Тип соглашения**
ЕГУ	Республика Армения	Ереван	Балабекян А. Гагинян С. Хованисян Г.	Меморандум
ИЯФ АН РУз	Республика Узбекистан	Ташкент	Эргашев Ф. Абдувалиев А.	Меморандум
ОИЭЯИ – Сосны	Республика Беларусь	Минск	Сорокин В. Корнеев С.	Меморандум
ИЯФ-МЭ	Республика Казахстан	Алмату	Жолдыбаев Т.	Меморандум
ИНИ РАН	РФ	Москва	Сидоркин С.	
ПУ-ПВ	РФ	Санкт Петербург	Садеги Х. Перез Квинтос М.	
ИЯИЯЭ	Болгария	София	Живков П.	

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

3. Кадровое обеспечение

3.1. Кадровые потребности в течение первого года реализации

(общее количество участников)

№№ п/п	**Категория работника**	**Основной персонал Сумма FTE**	**Ассоциированный персонал Сумма FTE**
1.	научные работники	9	7.2
2.	инженеры	3.3	0
3.	специалисты	0.5	0
4.	служащие	0	0
5.	рабочие	0	0
Итого:		**12.8**	**7.2**

3.2. Доступные кадровые ресурсы

3.2.1. Основной персонал ОИЯИ (общее количество участников)

№№ п/п	Категория работников	Фамилия	Подразделение	Должность	Сумма FTE
1.	научные работники	М. Параипан	ВБЛФВЭ	начальник сектора	1
		О. Белов	ВБЛФВЭ	начальник отделения	0.3
		Ж. Хушвактов	ДЛЯП	с. н. с.	0.5
		Л. Костов	ОИЯИ	вице-директор	0.2
		С. Куликов	ОИЯИ	вице-директор	0.2
		Н. Пухаева	ВБЛФВЭ	с. н. с.	0.5
		Е. Клевцова	ВБЛФВЭ	с. н. с.	0.3
		Т. Чан	ВБЛФВЭ	м. н. с.	1
		В. Джавадова	ВБЛФВЭ	м. н. с.	1
		И. Крячко	ВБЛФВЭ	м. н. с.	1
		К. Жолдасбеков	ВБЛФВЭ	старший лаборант	0.3
		В. Дунин	ВБЛФВЭ	с. н. с.	0.2
		Н. Дунин	ВБЛФВЭ	м. н. с.	0.2
		А. Балдин	ВБЛФВЭ	начальник отдела	0.2
		А. Солнышкин	ДЛЯП	с. н. с.	0.5
		А. Агапов	ДЛЯП	с. н. с.	0.2
		Г. Мицин	ДЛЯП	начальник сектора	0.2
		В. Стегайлов	ДЛЯП	н. с.	0.2
		В. Швецов	ФЛНФ	начальник отделения	0.3
		А. Рогов	ФЛНФ	с. н. с.	0.3
		Е. Ермакова	ФЛНФ	н. с.	0.2
2.	инженеры	Д. Дрноян	ВБЛФВЭ	инженер	1
		В. Пенкин	ВБЛФВЭ	инженер	1
		И. Семенова	ВБЛФВЭ	старший инженер	0.2
		Р. Акберов	ВБЛФВЭ	старший инженер	0.3
		Н. Стачук	ВБЛФВЭ	инженер	0.3
		В. Жеменик	ФЛЯР	старший инженер	0.5
3.	специалисты	И. Марин	ВБЛФВЭ	технический специалист	
4.	рабочие				
Итого:					**12.8**

3.2.2. Ассоциированный персонал ОИЯИ (общее количество участников)

№№ п/п	Категория работников	Организация-партнер	Сумма FTE
1.	научные работники	ЕГУ Армения ИЯФ АН Узбекистан ОИЭЯИ – Сосны Беларусь ИЯФ-МЭ Казахстан ИНИ РАН ПУ-ПВ ИЯИЭ Булгария	2 1.5 1 1.5 0.5 0.5 0.2
2.	инженеры		
3.	специалисты		

4.	рабочие		
Итого:			**7.2**

4. Финансовое обеспечение

4.1. Полная сметная стоимость проекта

Прогноз полной сметной стоимости (указать суммарно за весь срок, за исключением ФЗП).

Детализация приводится в отдельной форме.

4.2. Внебюджетные источники финансирования

Предполагаемое финансирование со стороны соисполнителей/заказчиков (общий объем).

Руководитель проекта _____/_____/

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)	100	20	20	20	20	20
	Материалы	250	50	50	50	50	50
	Оборудование и услуги сторонних организаций (пуско-наладочные работы)	1000	350	350	100	100	100
	Пуско-наладочные работы	0	0	0	0	0	0
	Услуги научно-исследовательских организаций	18	5	5	3	3	2
	Приобретение программного	12	3	3	2	2	2

		обеспечения						
		Проектирование/строительство	0	0	0	0	0	0
		Сервисные расходы (*планируются в случае прямой принадлежности к проекту)*						
Необходимые ресурсы	**Нормо-час**	Ресурсы						
		– сумма FTE,	85.3	12.5	15	18	20	20
		– ускорителя/установки,	2160	240	480	480	480	480
		– реактора,…..	0	0	0	0	0	0
Источники финансирования	**Бюджетные средства**	Бюджет ОИЯИ *(статьи бюджета)*	1380	428	428	175	175	174
	Внебюджет (доп. смета)	Вклады соисполнителей Средства по договорам с заказчиками Другие источники финансирования						

Руководитель проекта _____/_____/

Экономист Лаборатории _____/_____/

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА

НАИМЕНОВАНИЕ ПРОЕКТА_____

УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ ПРОЕКТА _____

ШИФР ПРОЕКТА _____

ШИФР ТЕМЫ _____

ФИО РУКОВОДИТЕЛЯ(-ЕЙ) ПРОЕКТА _____

СОГЛАСОВАНО:

ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ИНСТИТУТА	_____	_____	_____

	ПОДПИСЬ	ФИО	ДАТА
ГЛАВНЫЙУЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ИНСТИТУТА	_____ ПОДПИСЬ	_____ ФИО	_____ ДАТА
ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР	_____ ПОДПИСЬ	_____ ФИО	_____ ДАТА

ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ	_____ ПОДПИСЬ	_____ ФИО	_____ ДАТА
ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛАБОРАТОРИИ	_____ ПОДПИСЬ	_____ ФИО	_____ ДАТА
УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ЛАБОРАТОРИИ	_____ ПОДПИСЬ	_____ ФИО	_____ ДАТА
РУКОВОДИТЕЛЬ ТЕМЫ	_____ ПОДПИСЬ	_____ ФИО	_____ ДАТА
РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА	_____ ПОДПИСЬ	_____ ФИО	_____ ДАТА

- подписывается в рамке после ПКК

ОДОБРЕН ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ	_____ ПОДПИСЬ	_____ ФИО	_____ ДАТА

Приложение 4.

Форма отчета по Проекту

УТВЕРЖДАЮ

Директор Лаборатории

_____/_____/

“____“_____

202_ г.

ОТЧЕТ ПО ПРОЕКТУ (ИНФРАСТРУКТУРНОМУ ПРОЕКТУ)

ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ

1. Общие сведения по проекту
1.1. Научное направление

1.2. Наименование проекта

1.3. Шифр проекта

1.4. Шифр темы

1.5.Фактический срок реализации проекта

1.6. Руководитель(ли) проекта

2. Научный отчет
2.1. Аннотация

2.2. Развернутый научный отчет
2.2.1. Описание режима работы и функционирования основных систем и оборудования
2.2.2. Описание проведенных экспериментов (для экспериментальных проектов).
2.2.3. Описание проделанной научной работы и полученных результатов.
2.2.4. Список основных публикаций авторов ОИЯИ, включая ассоциированный персонал по результатам работы по проекту (список библиографических ссылок).
2.2.5. Полный список публикаций (приложение в электронном виде, для журнальных публикаций с указанием импакт-фактора журнала).
2.2.6. Список докладов на международных конференциях и совещаниях (приложение в электронном виде).
2.2.7. Патентная деятельность (при наличии)

2.3. Статус и стадия (TDR, CDR, ongoing project) реализации проекта
(включая процент реализации заявленных этапов по проекту) *(если применимо))*

2.4. Результаты сопутствующей деятельности
2.4.1. Научно-образовательная деятельность. Список защищенных диссертаций.
2.4.2. Полученные гранты (стипендии) ОИЯИ.
2.4.3. Награды и премии.
2.4.4. Иные результаты (экспертная, научно-организационная, научно-популяризационная деятельность).

3. Международное научно-техническое сотрудничество
Фактически участвующие страны, институты и организации

Организация	**Страна**	**Город**	**Участники**	**Тип соглашения**

4. План/факт анализ использованных ресурсов: кадровых (в т.ч. ассоциированный персонал), финансовых, информационно-вычислительных, инфраструктурных

4.1. Кадровые ресурсы (фактически на время подачи отчета) (общее количество участников)

№№ п/п	Категория работника	Основной персонал Сумма FTE	Ассоциированный персонал Сумма FTE
1.	научные работники		
2.	инженеры		
3.	специалисты		
Итого:			

4.2. Фактическая сметная стоимость проекта

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования			Стоимость (тыс. долл.) потребности в ресурсах	Предложение лаборатории по распределению финансирования и ресурсов				
				1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
		Международное сотрудничество (МНТС)						
		Материалы						
		Оборудование и услуги сторонних организаций						
		Пуско-наладочные работы						
		Услуги научно-исследовательских организаций						
		Приобретение программного обеспечения						
		Проектирование/строительство						
		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						

4.3. Другие ресурсы

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)					

5. Заключение

6. Предлагаемые рецензенты

Руководитель темы

_____/ _____/
“_____“ _____202_г.

Руководитель проекта

_____/ _____/
“_____“ _____202_г.

Экономист Лаборатории

_____/ _____/
“_____“ _____202_ г.