

ВЫСОКОПОТОЧНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ПУЧКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, УПРАВЛЯЕМЫЙ УСКОРИТЕЛЕМ ПРОТОНОВ

А. В. Виноградов^а, Ю. Н. Пепельшев^а, А. Д. Рогов^{а,1}, С. Ф. Сидоркин^б

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Институт ядерных исследований РАН, Москва

Рассматриваются параметры наиболее оптимального варианта высокопоточного импульсного источника нейтронов, ориентированного на использование вместо реактора ИБР-2М. Источник основан на бустере с активной зоной из двуокиси плутония с коэффициентом размножения не более 0,98 и мишенью из вольфрама. Источник управляется ускорителем протонов с энергией 1,2 ГэВ при мощности пучка 0,1 МВт. Мощность источника составляет 8 МВт, частота повторения импульсов — 30 с^{-1} . Показана возможность получения средней плотности потока тепловых нейтронов на поверхности плоского водяного замедлителя на уровне $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Parameters of the most optimal variant of a high-flux pulsed neutron source (fourth-generation neutron source in Dubna), which is foreseen to replace the IBR-2M reactor in the future, are considered. The source is based on a booster with a plutonium dioxide core (multiplication factor of no more than 0.98) and a tungsten target. The source is driven by a proton accelerator with an energy of 1.2 GeV and beam power of 0.1 MW. The power of the source is 8 MW, pulse repetition rate is 30 s^{-1} . The possibility of obtaining the average thermal neutron flux density on the surface of a flat water moderator up to $2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ is demonstrated.

PACS: 29.25.Dz; 28.50.Ky

ВВЕДЕНИЕ

Действующий в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ (Дубна) высокопоточный источник нейтронов на базе импульсного реактора ИБР-2М с плотностью потока нейтронов на уровне $\sim 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ к началу 2040-х гг. исчерпает свой ресурс и будет остановлен. Вместо ИБР-2М предлагается рассмотреть источник на базе подкритической импульсной сборки, управляемой ускорителем протонов. Другие типы нейтронных источников в настоящее время и в отдаленной перспективе не позволяют получить высокие нейтронно-физические параметры, необходимые для проведения перспективных научных исследований [1]. С другой стороны, потенциальных вариантов нейтронных источников, управляемых протонными ускорителями, много. В работе [2] все варианты источников нейтронов с управлением пучком протонов классифицированы

¹E-mail: arogov@nf.jinr.ru

по некоторому числу категорий, в каждой из которых найден оптимальный вариант. Оптимизация источника состояла в получении максимальной плотности потока тепловых нейтронов при приемлемых значениях других важных для работы источника параметрах. На основе результатов указанной выше работы предлагается импульсный нейтронный источник, оптимальный по своим нейтронно-физическим и техническим параметрам, и, что особенно важно, показана возможность его практической реализации. В работе приводится краткое описание источника с достаточно подробным расчетным обоснованием.

1. КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ИМПУЛЬСНОМУ ИСТОЧНИКУ НЕЙТРОНОВ

Основные требования, предъявляемые к новому источнику нейтронов, следующие.

- Плотность потока тепловых нейтронов на поверхности плоского водяного замедлителя источника должна быть не менее $\sim 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.
- Мощность протонного пучка на мишени должна быть не более 0,1 МВт.
- Необходимо обеспечить высокий уровень ядерной и радиационной безопасности, использовать только глубоко подкритический режим. По современным правилам ядерной безопасности (ЯБ) при $K_{\text{эф}} = 0,98$ не нужна система защиты, как это требуется в критическом реакторе. Эти правила распространяются на подкритические системы малой, так называемой нулевой, мощности (кВт). В будущем для подкритических систем большой мощности (МВт) правила ЯБ могут измениться в сторону ужесточения требований, поскольку необходимо учитывать различного рода мощностные и иные эффекты реактивности, возникающие при нарушениях в активной зоне источника и при сбоях в работе ускорителя. В этом случае ЯБ может быть обеспечена за счет глубокой подкритичности активной зоны.
- Реализуемость.

2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ИСТОЧНИКА

В этом разделе дадим краткое описание источника. Отдельные элементы источника будут подробно представлены ниже, в других разделах. Расчетная модель предлагаемого источника приведена на рис. 1. Источник состоит из активной зоны (АЗ) с топливом из двуокиси плутония (PuO_2). Активная зона разделена на две части. Между отдельными частями АЗ помещен вращающийся диск, выполняющий несколько функций: во-первых, функцию мишени для протонного пучка, во-вторых, функцию модулятора реактивности для уменьшения фона между импульсами и, в-третьих, функцию для облегчения теплоотвода. Ось вращения мишенного диска направлена вертикально. Согласно приведенной в работе [2] классификации рассматриваемый источник относится к категории импульсного однозонного бустера. Загрузка АЗ выполняется в горизонтальной плоскости с плотной упаковкой твэлами в бескасетном варианте. Охлаждение АЗ осуществляется водой. Таким образом, бустер относится к источникам со смешанным спектром нейтронов: 98 % нейтронов в АЗ составляют быстрые и резонансные нейтроны. Частота импульсов мощности равна 30 с^{-1} .

АЗ окружена бериллиевым отражателем. Выход тепловых нейтронов осуществляется с поверхности водяных и холодных замедлителей, установленных в двух плоскостях —

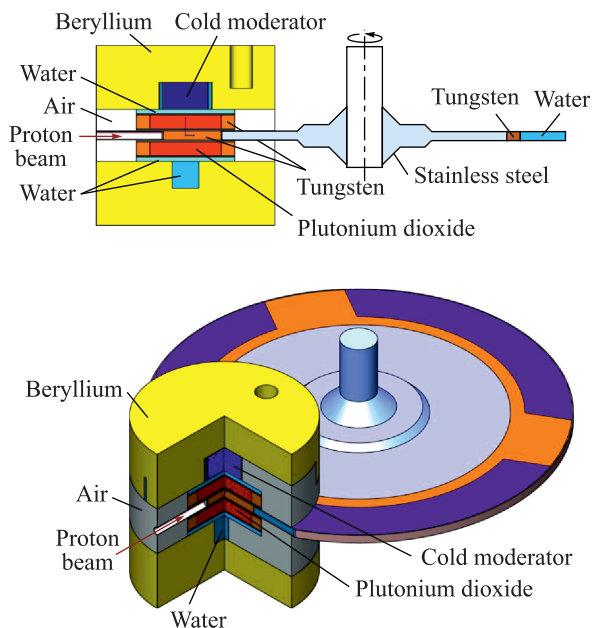


Рис. 1. Расчетная модель импульсного нейтронного источника с вращающейся вольфрамовой мишенью и АЗ из двуоксида плутония

над и под активной зоной. Замедлители оптимальных размеров примыкают к поверхности соответствующих предзамедлителей, расположенных непосредственно над АЗ. Предзамедлители отделены от АЗ слоем гадолиния или вольфрам-ренийевым сплавом — материалом с высоким сечением в резонансной области энергий нейтронов. В верхней части замедлителей установлен холодный замедлитель (ХЗ), в качестве которого принята конструктивная проработка для ESS с параводородом [3]. Вывод нейтронных пучков осуществляется в тангенциальной геометрии, что уменьшает прямой фон от АЗ. Водяные замедлители, расположенные в нижней плоскости, разделены на две группы, в одной из которых для сокращения длительности импульса тепловых нейтронов расположен «отравленный» замедлитель. Таким образом, исследователи, работающие на выведенных нейтронных пучках, имеют возможность использовать широкий спектр нейтронов — от тепловых до холодных.

3. МИШЕНЬ

Внешний импульсный источник нейтронов для подкритической сборки обеспечивается генерацией нейтронов при торможении протонного пучка в мишени. В процессе реакции скалывания на последних этапах каскадного процесса образуются так называемые испарительные нейтроны со спектром, близким к спектру нейтронов деления. Далее первичные нейтроны размножаются в окружающей мишень активной зоне.

3.1. Общее описание мишени. В качестве исходных данных по выбору оптимальных для данной конструкции АЗ мишеней используются нейтронно-физические характери-

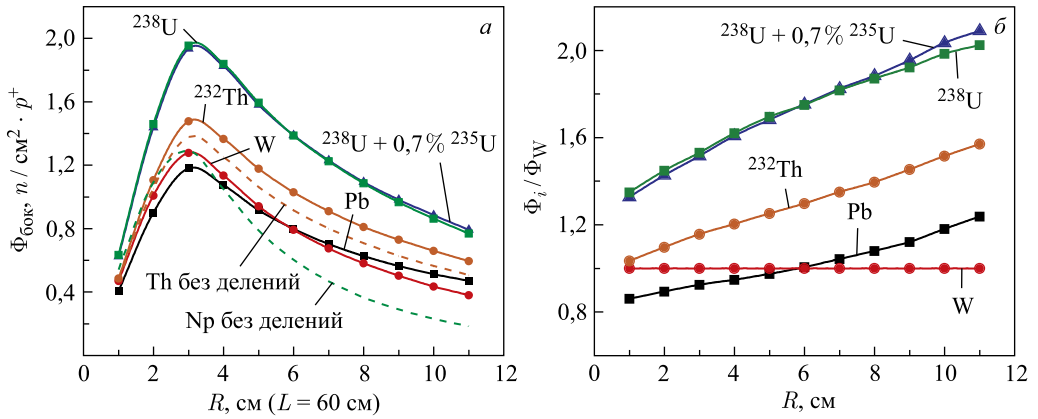


Рис. 2. Изменение средней плотности потока нейтронов на один протон с энергией 1 ГэВ на боковой поверхности цилиндрических мишеней длиной 60 см из вольфрама, свинца, тория, урана-238 и природного урана в зависимости от радиуса мишеней (а) и то же самое — относительно мишени из вольфрама (б)

стики мишеней из работы [2]. Для примера на рис. 2 показано изменение средней плотности потока нейтронов на один протон с энергией 1 ГэВ на поверхности изолированных мишеней из вольфрама, свинца, тория, урана-238 и природного урана в зависимости от радиуса мишеней. Вольфрам, как видно из рис. 2, уступает по выходу нейтронов торию и урану, но ценен отсутствием фазовых переходов и способностью выдерживать высокие температуры, что важно для надежной эксплуатации мишени. Кроме того, по сравнению с изолированным состоянием мишени, как показывают расчеты, реальное расположение мишени в центре АЗ несколько сглаживает преимущество урана по выходу нейтронов относительно вольфрама. Поэтому вышеназванные обстоятельства не позволяют полностью использовать высокие нейтронно-физические характеристики мишени из урана. В то же

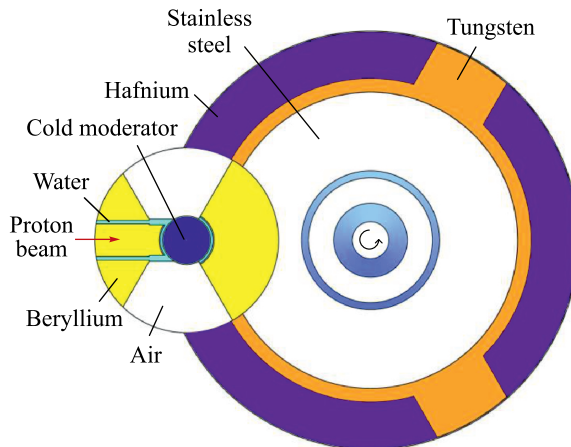


Рис. 3. Схематическое представление мишенного диска

время мишени из урана или тория могут служить некоторым резервом для повышения выхода нейтронов.

Конструкция мишени представляет собой вращающийся диск со вставками из вольфрама. Как показывают расчеты, могут быть реализованы два варианта мишени: мишень без модуляции реактивности и мишень с модуляцией. Поверхность мишенного диска с функцией модуляции реактивности с обеих сторон покрыта слоями гафния (гадолиния) толщиной 3 мм, между которыми находится вода. В диск через 120° по радиусу вмонтированы три вставки из вольфрама. Каждая вставка — мишень, на которую синхронно при вращении диска попадает пучок протонов. Таким образом, за один оборот диска генерируется три нейтронных импульса. Схематическое представление мишенного диска приведено на рис. 3.

Характеристики прочности мишени должны обеспечивать ее вращение с частотой 10 с^{-1} . Для обеспечения нужной скорости изменения модулирующей реактивности линейная скорость обода в АЗ должна быть не менее 100 м/с. Это требование накладывает ограничение на радиус мишенного диска: он должен быть не менее 1,0–1,5 м.

3.2. Мишень как модулятор реактивности. Дисковая мишень, как было сказано выше, используется для снижения фона между импульсами как модулятор реактивности. Инжекция протонов осуществляется в моменты достижения максимумов реактивности, когда вольфрамовая вставка находится между двумя частями АЗ. В интервалах между импульсами вольфрамовая вставка выходит за пределы АЗ, соответственно, подкритичность АЗ увеличивается, а мощность уменьшается. Для подкритической сборки с модулятором реактивности реактивность на мгновенных нейтронах $\varepsilon = \rho - \beta$ представлена в виде суммы $\varepsilon = \varepsilon_m + \varepsilon_{\text{мр}}$, где ε_m — максимальное значение реактивности, $\varepsilon_{\text{мр}}$ — нормированная реактивность модулятора. При отсутствии модулятора $\varepsilon_{\text{мр}} = 0$. Реактивность ε всегда отрицательна.

В качестве момента инъекции принят момент, когда реактивность подкритической сборки ε_m достигает максимального значения. Соответствующее умножение по мгновенным нейтронам равно $Y = 1/(-\varepsilon_m)$, где $\varepsilon_m < 0$. Для расчетов по оценке фона между импульсами в качестве исходных данных модулятора реактивности использовались следующие значения: эффективность модулятора $\Delta K_{\text{мр}} = 0,02\text{--}0,04$, коэффициент параболы вблизи максимума реактивности $\alpha = 1,14 \cdot 10^5 \text{ с}^{-2}$. На рис. 4 для примера показано изменение нормированной реактивности модулятора в зависимости от времени вращения мишени, т. е. реактивность, максимальное значение которой принято нулевым.

На рис. 5 показано изменение доли фона между импульсами в зависимости от глубины модуляции реактивности при некоторых значениях коэффициента размножения (умножения) и от коэффициента размножения при некоторых значениях глубины модуляции. Расчеты проведены при мощности АЗ, равной 8 МВт, и при времени жизни мгновенных нейтронов 0,5 мкс. Как видно из рис. 5, модуляция реактивности нужна при достаточно большом умножении — более 50 ($K_{\text{эф}} > 0,98$). В этом случае нейтронный фон существенно снижается. Глубина модуляции при этом должна быть достаточно большой — $\Delta K_{\text{мр}} > 0,02$. При глубокой подкритичности ($K_{\text{эф}} < 0,95$, умножение 20) модуляция слабо влияет на снижение фона. Поэтому при коэффициенте размножения $K_{\text{эф}} < 0,95$ и меньше функцию модуляции при вращении мишени можно исключить. При этом конструкция мишени упрощается и становится близкой к конструкции мишени ESS.

Чтобы обеспечить глубокую модуляцию реактивности при умножении 50, мишень выполнена по идее нейтронной ловушки. Нейтронная ловушка «разрывает» нейтронную

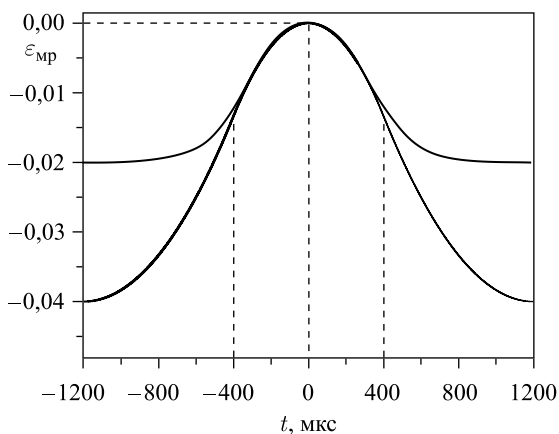


Рис. 4. Нормированный импульс реактивности источника, обусловленный модулятором реактивности

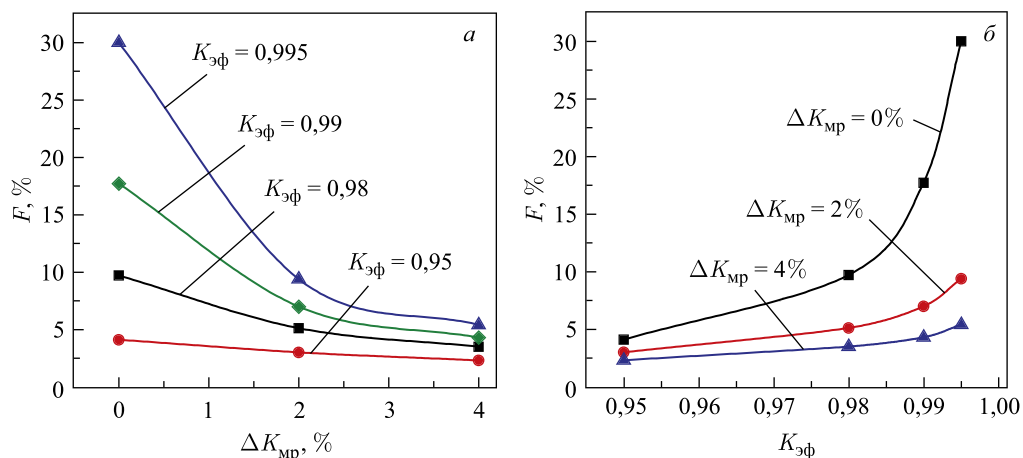


Рис. 5. Зависимость доли нейтронного фона между импульсами F от глубины модуляции реактивности $\Delta K_{\text{мр}}$ при умножении 20 ($K_{\text{эф}} = 0,95$), 50 ($K_{\text{эф}} = 0,98$), 100 ($K_{\text{эф}} = 0,99$) и 200 ($K_{\text{эф}} = 0,995$) (а) и от $K_{\text{эф}}$ при значениях $\Delta K_{\text{мр}} = 0, 2$ и 4% (б). Время жизни мгновенных нейтронов $\tau = 0,5$ мкс

связь между двумя частями АЗ в моменты времени вне действия импульса мощности, когда вольфрамовая вставка мишенного диска выходит за пределы АЗ.

4. АКТИВНАЯ ЗОНА

Активная зона с топливом из двуокиси плутония (PuO_2) представляет собой две половинки, разделенные промежутком для размещения мишенного диска (рис. 6). Обе половинки АЗ в плотной упаковке заполнены твэлами, идентичными твэлам импульсного реактора ИБР-2, но в бескассетном варианте. Для уменьшения времени жизни мгновенных нейтронов и сокращения длительности импульса АЗ отделена от замедлителей слоем

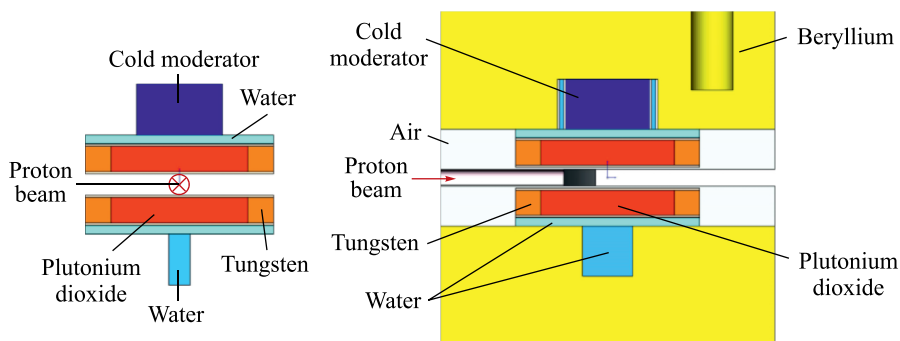


Рис. 6. Схема расчетной модели АЗ в окружении замедлителей

гадолия толщиной 2 мм. Загрузка АЗ осуществляется в горизонтальной плоскости. В качестве теплоносителя используется вода. Здесь появляется желание уйти от высокотемпературных технологий охлаждения АЗ, присущих быстрым реакторам с топливом на основе плутония, как, например, реактору ИБР-2. Но основная цель использования воды для охлаждения АЗ состоит в следующем. Во-первых, для получения высоких потоков нейтронов на поверхности АЗ нужна достаточно компактная зона. Вода смягчает нейтронный спектр, что увеличивает эффективность твэлов и, соответственно, уменьшает загрузку АЗ. Кроме того, водяное охлаждение более эффективно по сравнению с натриевым. Это обстоятельство позволяет увеличить энергонапряженность топливных элементов и сохранить необходимый малый объем АЗ. Параметры водяного охлаждения источника и связанные с ним эффекты реактивности рассмотрены ниже, в других разделах. Здесь отметим только следующее: во избежание водяного эффекта при замене твэлов расчет загрузки АЗ проводился для оболочек твэлов, изготовленных из сплава с гафнием как поглотителя тепловых нейтронов. Добавка 2 % гафния в нержавеющую оболочку твэла выводит почти 1,4 % реактивности при практически постоянном времени жизни нейтронов. Более подробно эффекты реактивности рассмотрены в разд. 10.

Топливо представляет собой таблетки из двуокиси плутония PuO_2 втулочного типа диаметром 7,4 мм, помещенные в виде столбика в твэл с внешним диаметром 8,62 мм. Полная загрузка АЗ при умножении 50 ($K_{эф} = 0,98$) составляет 580 твэлов. Шаг решетки для размещения твэлов равен 9,11 мм. Максимальное выгорание тяжелых элементов плутония в АЗ равно 10 %. Основные параметры АЗ представлены в сводной таблице параметров источника (табл. 5, разд. 11).

5. УСКОРИТЕЛЬ

Основные параметры протонного ускорителя для предлагаемого источника нейтронов приведены в табл. 1.

В сильноточных протонных ускорителях импульсный ток стараются снизить, но для импульсных источников нейтронов его надо повышать, чтобы иметь высокий средний поток при пониженной частоте импульсов. Для сохранения высоких импульсных параметров ускорителя может использоваться накопитель-группирователь, позволяющий свернуть длинный импульс 100–200 мкс в более короткий с соответствующим увеличе-

Таблица 1. Основные параметры ускорителя протонов

Параметр	Значение
Кинетическая энергия протонов, ГэВ	1,2
Частота повторения импульсов, с ⁻¹	10–30
Средний ток протонов, мА	0,028–0,083
Мощность пучка протонов на мишени, МВт	0,03–0,10
Длительность импульса протонов, мкс	20–200 *
Ток в импульсе, мА	До 50 *

* Длительность импульса протонов и ток в импульсе требуют пояснения.

нием импульсного тока. Поэтому указанные звездочками в таблице параметры требуют дополнительного согласования с разработчиками ускорителя. Длина линейной части ускорителя со сверхпроводящими резонаторами может составлять 300 м и более. Многие из представленных в табл. 1 параметров реализованы на существующих ускорителях и используются в разных странах для генерации каскадно-испарительных нейтронов [3, 4].

6. ИМПУЛЬСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКА

Важны следующие импульсные характеристики источника: импульс мощности в АЗ и импульс тепловых нейтронов на поверхности водяного замедлителя.

Импульс мощности оценен с помощью решения односточечного уравнения кинетики. Параметры ускорителя соответствовали данным, представленным в табл. 1, а ход реактивности модулятора от времени — данным рис. 4. Форма импульса мощности рассчитана для подкритического состояния источника с базовым коэффициентом размножения 0,98 (умножение с учетом запаздывающих нейтронов 50). Время жизни мгновенных нейтронов составляло 0,5 и 1,3 мкс. Эти значения определялись конструктивными особенностями АЗ и были получены независимо с помощью расчетов по методу Монте-Карло (ММК). Первичный источник испарительных нейтронов генерировался для вольфрамовой мишени при энергии протонов 1,2 ГэВ. Получены данные о форме импульса мощности, выделяющейся в АЗ, и данные о влиянии времени жизни мгновенных нейтронов на фон между импульсами при воздействии модулирующей реактивности. Некоторые результаты расчетов по форме импульса мощности представлены на рис. 7 и в табл. 2 при длительности инициирующего протонного импульса 20 мкс. Эта длительность выбрана как минимально возможная для генерации тепловых нейтронов в водяном замедлителе с малым временем термализации. Обычно временные константы спада нейтронного потока в водяных замедлителях получаются на уровне ~ 60 мкс.

Из рис. 7 и табл. 2 видно, что время жизни нейтронов существенно влияет на длительность импульса и слабо влияет на фон. Фон, как было показано в п. 3.2, заметно уменьшается с введением модулятора реактивности при умножении ближе к реакторному режиму — 50 и более. Для сокращения длительности импульса при фиксированном умножении, как видно из рис. 7, важно иметь малое время жизни мгновенных нейтронов. Длительность импульса в подкритической системе определяется длительностью протон-

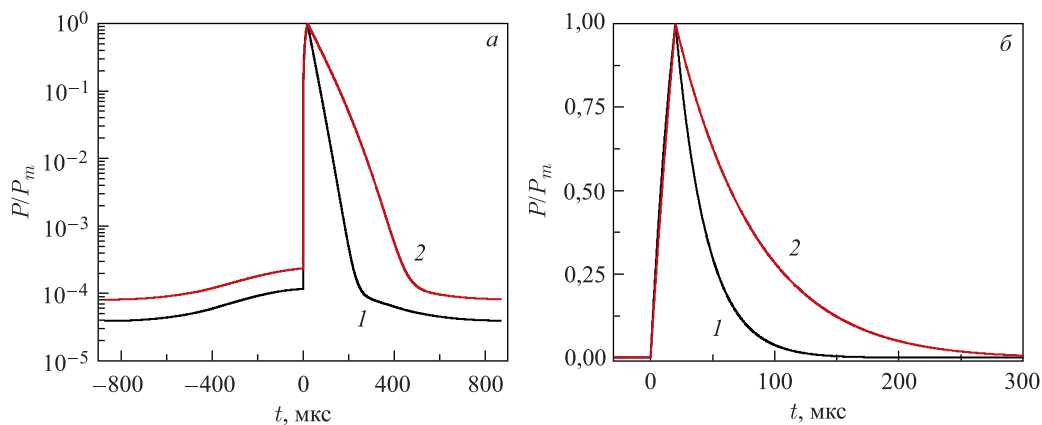


Рис. 7. Расчетная форма импульса мощности нейтронного источника в долях от максимального значения при $K_{эф} = 0,98$ для двух значений времени жизни мгновенных нейтронов — 0,5 (1) и 1,3 мкс (2); частота и длительность импульсов протонов составляет соответственно 30 Гц и 20 мкс: а) логарифмический масштаб, б) линейный

Таблица 2. Параметры импульса мощности в расчетах по одноточечной модели

Параметр	Значение	
Коэффициент размножения $K_{эф}$	0,98	
Средняя тепловая мощность источника, МВт	8	
Мишень	W	
Частота повторения импульсов, c^{-1}	30	
Средний ток протонов, мА	0,083	
Мощность пучка протонов на мишени, МВт	0,1	
Энергия протонов, ГэВ	1,2	
Длительность импульса протонов, мкс	20	
Эффективность модулятора реактивности, абс. ед.	0,04	
Энергия импульса, МДж	0,45	
Время жизни нейтронов, с	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$
Длительность импульса, мкс	27	45
Доля фона к полной энергии за период импульса, %	3,5	3,6
Мощность в импульсе, МВт	9500	5700

ного импульса и характером спада основной компоненты нейтронного потока с временной константой $\tau = \tau_n / \Delta \epsilon$, где τ_n и $\Delta \epsilon$ — время жизни мгновенных нейтронов и подкритичность системы по мгновенным нейтронам соответственно.

Форма импульса тепловых нейтронов в статическом режиме источника (без модулятора реактивности), вытекающих с поверхности плоского водяного замедлителя, рассчитана с помощью ММК (рис. 8). На рис. 8, а показана реакция нейтронного источника на

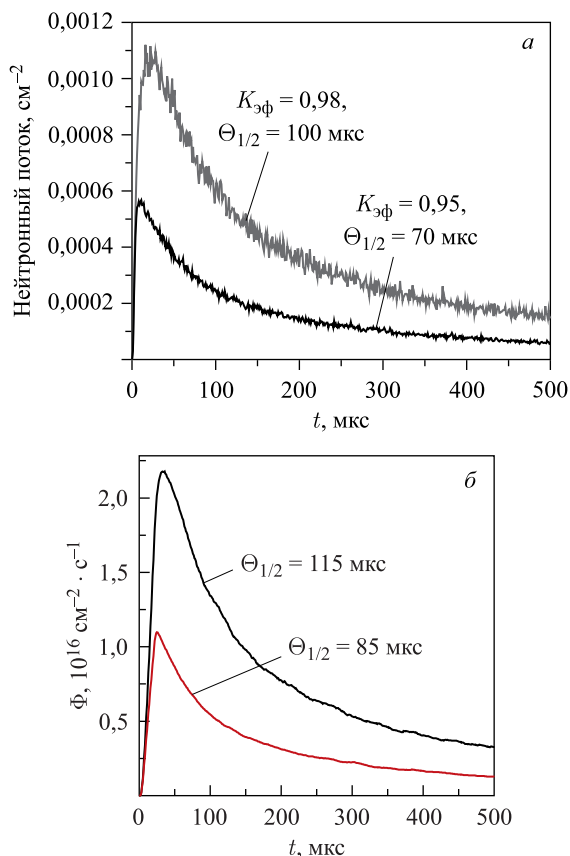


Рис. 8. Форма импульса тепловых нейтронов на поверхности плоского водяного замедлителя при значениях коэффициента размножения $K_{эф} = 0,98$ и $0,95$ без модуляции реактивности: а) воздействие δ -импульса протонов; б) импульс протонов длительностью 20 мкс

воздействие δ -импульса протонов (бесконечно короткого импульса) при двух значениях коэффициента размножения — 0,98 и 0,95. Параметры импульса тепловых нейтронов приведены в табл. 3. В данном расчете модулирующая реактивность отсутствует, время жизни нейтронов достаточно велико (1,3 мкс), поэтому расчеты показывают максимально возможную по длительности динамику тепловых нейтронов при воздействии предельно короткого импульса протонов. На рис. 8, б приведена форма импульса тепловых нейтронов для прямоугольного импульса протонов длительностью 20 мкс. В соответствии с конструкцией замедлителей (вода замедлителей в окружении бериллия, см. рис. 6) в импульсе тепловых нейтронов присутствуют две экспоненты спада нейтронного потока с периодами 66 и 235 мкс. Первая компонента характеризует время термализации быстрых нейтронов в водяном замедлителе, вторая — в бериллии. Нужно отметить, что длительность импульса тепловых нейтронов, равная 100 и 70 мкс при умножении 50 и 20, существенно зависит от экранировки замедлителей и слабо — от длительности протонного импульса (Θ_p). Например, при умножении 20 ($K_{эф} = 0,95$) длительность теплового импульса при $\Theta_p = 20$ мкс равна 85, а при $\Theta_p = 30$ мкс — 90 мкс.

Таблица 3. Параметры импульса тепловых нейтронов на поверхности плоского водяного замедлителя при воздействии δ -импульса протонов на вольфрамовую мишень без модуляции реактивности

Параметр	Значение	
Частота повторения импульсов, с^{-1}	30	
Средний ток протонов, мА	0,083	
Мощность пучка протонов на мишени, МВт	0,1	
Энергия протонов, ГэВ	1,2	
Длительность импульса протонов	δ -импульс	
Время жизни нейтронов, с	$1,0 \cdot 10^{-6}$	
Коэффициент размножения $K_{\text{эф}}$	0,98	0,95
Длительность импульса на полувысоте, мкс	100	70
Средняя плотность потока тепловых нейтронов на поверхности плоского замедлителя, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$2,0 \cdot 10^{14}$	$1,0 \cdot 10^{14}$
Плотность потока тепловых нейтронов в импульсе, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$6,4 \cdot 10^{16}$	$4,5 \cdot 10^{16}$

7. ТЕПЛОСЪЕМ

Данные по теплосъему АЗ нейтронного источника приведены в табл.4. Из анализа данных табл.4 следует, что параметры теплоносителя и перепады температуры в АЗ при указанной проектной мощности источника соответствуют требованиям безопасного охлаждения АЗ.

Таблица 4. Основные параметры охлаждения активной зоны

Параметр	Значение
Номинальная мощность, МВт	10
Удельная энергонапряженность АЗ, кВт/л	350
Объем, л	20
Высота, см	46
Площадь поперечного сечения АЗ, см^2	$570 (46 \times 6,2 \times 2 = 570,4)$
Площадь проходного сечения теплоносителя, см^2	$90 (570 \text{ см}^2 \cdot 0,153 = 87,2)$
Загрузка топлива PuO_2 , кг	$130 (20 \text{ л} \cdot 0,690 \cdot 9,6 \text{ г/см}^3)$
Объемные доли материалов АЗ:	
топливо PuO_2	0,691
сталь	0,157
вода	0,153
Расход воды, $\text{м}^3/\text{ч}$	94–157
Скорость воды, м/с	3–5
Температура воды на входе в АЗ, $^{\circ}\text{C}$	45–50
Подогрев воды в АЗ при $120 \text{ м}^3/\text{ч}$, К	35–50 ($\sim 4 \text{ атм}$)

8. ЗАМЕДЛИТЕЛИ И ТЕПЛОВЫЕ НЕЙТРОНЫ

Поскольку задача состоит в генерации нейтронов с поверхности источника, оценим общий нейтронный баланс. Для бустера при $K_{эф} = 0,98$ и параметрах ускорителя, представленных в табл. 5 (см. разд. 11), нейтронный баланс выглядит следующим образом: общее число нейтронов, возникающих за счет делений на один протон, равно 1900, из них 620 идут на поддержание цепной реакции и только 520 выходят за пределы АЗ. Таким образом, общая утечка нейтронов всех энергий с поверхности АЗ составляет 27 % и КПД источника как генератора нейтронов — не более 30 %. КПД источника при генерации тепловых нейтронов еще меньше.

На рис. 9 показана схема расположения замедлителей тепловых и холодных нейтронов относительно АЗ: в двух плоскостях с широким угловым доступом в 60° для нейтронных пучков к поверхностям всех замедлителей с каждой стороны. Нижний замедлитель состоит из двух частей — водяного замедлителя пушечной геометрии и водяного замедлителя, «отравленного» борной кислотой для сокращения длительности импульса.

Верхний замедлитель также состоит из двух частей — водяного плоского и цилиндрического холодного замедлителя на основе пара водорода [5]. Диаметр холодного замедлителя равен 16 см, толщина предзамедлителей 1 и 2,5 см. Все замедлители просматриваются с обеих сторон нейтронными каналами. Для всех замедлителей исключен прямой прострел быстрых нейтронов в каналы тепловых нейтронов. В зависимости от направления нейтронного пучка «видимая» каналом часть верхнего замедлителя может генерировать или только холодные нейтроны, или холодные и тепловые вместе, т. е. во втором случае некоторые пучки нейтронов «видят» так называемый биспектральный замедлитель.

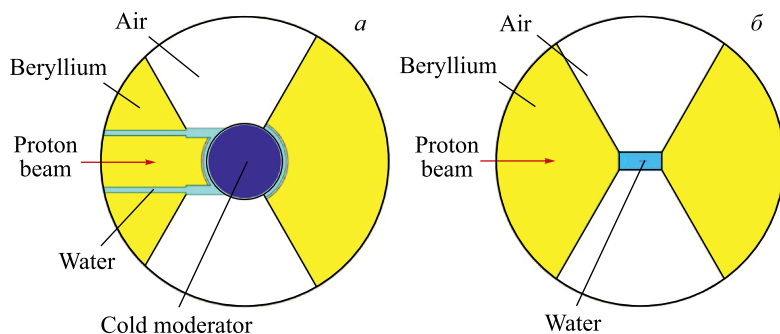


Рис. 9. Расчетная схема расположения замедлителей нейтронов: а) вид сверху, б) вид снизу

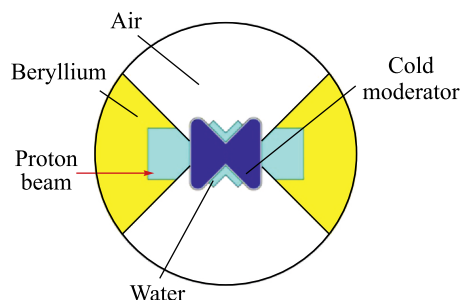


Рис. 10. Расчетная схема расположения замедлителя нейтронов типа «баттерфляй»

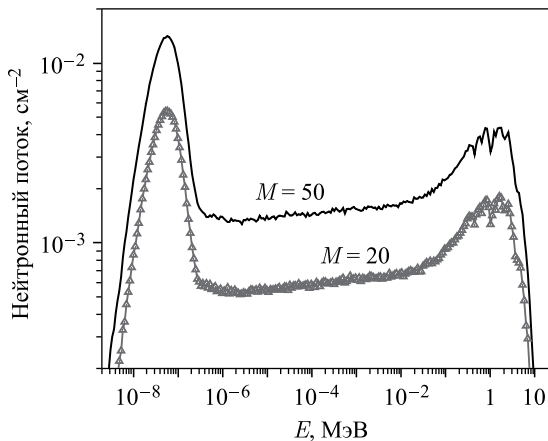


Рис. 11. Распределение потока тепловых нейтронов по энергии на поверхности плоского водяного замедлителя для двух значений умножения k_3 — 50 и 20

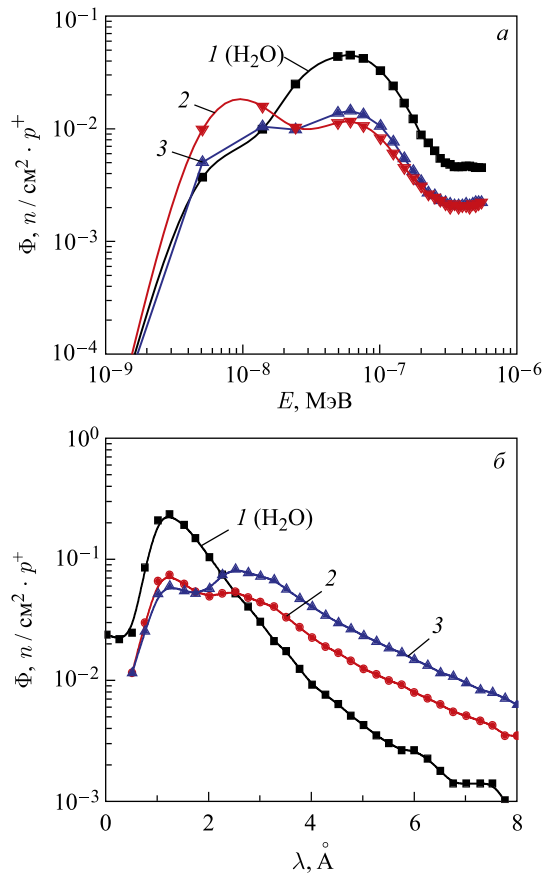


Рис. 12. Зависимость плотности потока нейтронов от энергии (а) и от длины волны (б) на поверхности замедлителей: 1 — нижнего водяного замедлителя; 2 — верхнего биспектрального; 3 — только холодного

Дополнительно как один из перспективных вариантов холодного замедлителя с высокой светимостью в отдельных направлениях при небольшом телесном угле рассматривается вариант замедлителя типа «баттерфляй» [5]. Этот замедлитель в качестве сменного может быть использован вместо базового. В замедлителе «баттерфляй», как и в основном ХЗ, используется параводород. Вид замедлителя представлен на рис. 10. По данным работы [5] светимость холодных нейтронов на некоторых выделенных направлениях нейтронных пучков со стороны замедлителя «баттерфляй» может быть увеличена в два раза и более.

На рис. 11 и 12 приведены расчетные распределения тепловых и холодных нейтронов по энергии, полученных на поверхности плоского водяного, биспектрального и холодного замедлителей, для двух значений: $K_{эф} = 0,98$ и $0,95$. Из-за того, что пучки тепловых нейтронов не «просматривают» непосредственно поверхность АЗ, доля тепловых нейтронов в полном спектре нейтронов довольно велика.

9. НЕЙТРОННЫЕ ПУЧКИ

Конструкция нейтронного источника позволяет с высокой эффективностью организовать вывод тепловых и холодных нейтронов в большое число горизонтальных нейтронных каналов (пучков). Схема расположения горизонтальных нейтронных пучков для всех замедлителей, расположенных в двух плоскостях, приведена на рис. 13. Как видно из этого рисунка, каждый замедлитель «просматривается» с двух противоположных сторон в угловых конусах по 60° . Угловые зоны видимости со стороны нейтронных пучков для верхних и нижних замедлителей не перекрываются. Таким образом, создаются максимально удобные условия для размещения оборудования вблизи вывода пучков. Это обстоятельство способствует существенному повышению эффективности использования нейтронов в пучках и нейтронов источника в целом. Максимально возможное число ней-

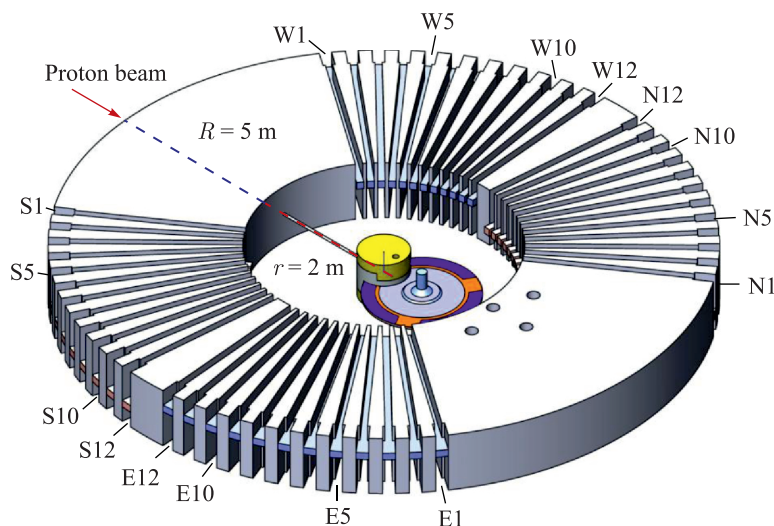


Рис. 13. Схема расположения максимального числа горизонтальных нейтронных каналов для двух плоскостей замедлителей (в направлении протонного пучка видны вертикальные каналы для облучения образцов)

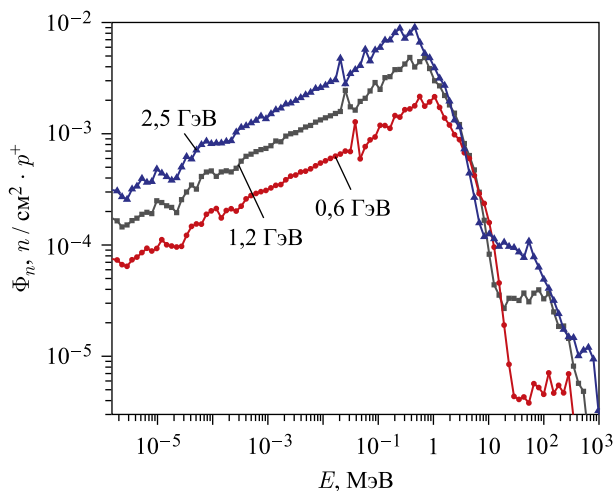


Рис. 14. Плотность потока нейтронов на один протон в зависимости от энергии нейтронов, вылетающих с торцевой поверхности мишени из вольфрама при энергии протонов 0,6, 1,2 и 2,5 ГэВ

тронных пучков в рассматриваемом источнике составляет 48. Пучок протонов проходит через мишень при достаточно широком телесном угле и не создает радиационных помех в зоне вывода нейтронных пучков.

Дополнительно к горизонтальным каналам вывода тепловых и холодных нейтронов в источнике предусмотрены несколько вертикальных каналов для облучения образцов. Спектральный состав каскадно-испарительных нейтронов, сформированный в вольфрамовой мишени, частично содержит высокоэнергетические (вплоть до начальной энергии протонов) нейтроны, направленные по оси действия протонного пучка в сторону биологической защиты. Поэтому вертикальные каналы позволяют использовать нейтроны, близкие к спектру деления, и высокоэнергетическую компоненту конверсионных нейтронов для облучения образцов, например, деталей космических аппаратов или материалов для термоядерных установок. На рис. 14 показаны расчетные спектры нейтронов, вылетающих с торцевой поверхности мишени из вольфрама, при некоторых значениях иницирующей энергии протонов. Эти данные характеризуют спектральный состав нейтронов в вертикальных каналах облучения, расположенных по оси пучка протонов. Ближе всего спектр расчетных данных соответствует спектру нейтронов в вертикальном канале, проходящем через бериллиевый замедлитель. Для этого канала плотность потока высокоэнергетических нейтронов в диапазоне энергии 20–100 МэВ при начальной энергии протонов, равной 1,2 ГэВ, составляет $1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

10. ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Нейтронный источник обладает эффектом естественной безопасности. Основная проектная авария, заключающаяся в уменьшении объемной доли воды в результате кипения или потери теплоносителя, приводит к «ужесточению» спектра нейтронов и большому отрицательному эффекту реактивности. Расчетный эффект полного слива воды (теплоносителя) из АЗ отрицательный и составляет не менее -3% .

При сборке и перегрузке твэлов на их месте образуется водяная полость, которая становится дополнительным источником тепловых и промежуточных нейтронов. Это приводит к положительному эффекту реактивности. Для предотвращения такого рода нежелательного эффекта оболочки кассет изготавливаются из сплава на основе гафния (поглотителя тепловых нейтронов) Hf-Nb (2 % весовых)–Zr (20 % весовых) — ГНЦ20. Тогда при извлечении твэлов и замене их на воду эффект реактивности будет отрицательным. Для более надежного исключения указанной положительной компоненты реактивности в конструкции АЗ предусмотрены несколько опорных перегородок, выполненных из гафния [8, 9]. Введение таких перегородок, во-первых, исключает различного рода положительные эффекты, во-вторых, улучшает конструктивную жесткость АЗ и, что очень важно, уменьшает время жизни мгновенных нейтронов. Последнее приводит к соответствующему сокращению длительности импульса мощности.

Отдельно, как важный элемент ЯБ, рассматриваются эффекты реактивности, возникающие при различных сбоях и нарушениях в работе ускорителя. Результатом сбоев ускорителя может быть, например, случайное изменение энергии протонов, тока или длительности импульса протонного пучка (например, при пробоях ускорительных секций) и т. д. Эти исследования представляют самостоятельный интерес, результаты будут отражены в отдельной работе.

11. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКА

Основные характеристики импульсного источника нейтронов представлены в табл. 5. Здесь необходимо пояснить следующее. Длительность и частота следования импульсов определяются возможностями ускорителя. Значения статических параметров источника, т. е. параметров, которые можно усреднить по времени и которые могут быть реализованы при постоянном токе ускорителя, таких как средняя плотность потока нейтронов, средняя мощность и т. д., зависят от мощности протонного пучка на мишени. Импульсные характеристики (пиковые значения параметров в импульсе) зависят от частоты и длительности импульсов протонов $\sim (f\Theta_p)^{-1}$ и ограничены допустимым пиковым током ускорителя. В современных ускорителях предельный пиковый ток протонов составляет ~ 50 мА. Поэтому параметры источника нейтронов в табл. 5 представлены с учетом ограничений в 50 мА пикового тока ускорителя. При техническом усовершенствовании ускорителей пиковые параметры источника могут быть улучшены.

Предложенный вариант источника нейтронов является только базовой концепцией, которая в процессе проработки может быть также улучшена.

1. Для сокращения длительности импульса можно уменьшить среднее время жизни мгновенных нейтронов деления до $\sim 0,2\text{--}0,3$ мкс, если вместо легкой воды в качестве теплоносителя использовать смесь $\text{H}_2\text{O-D}_2\text{O}$.

2. Шаг решетки в АЗ можно увеличить от 9,1 до 9,5 мм. В этом случае тепловой режим АЗ существенно улучшится.

3. Если использовать в будущем вместо PuO_2 нитридное топливо PuN , можно уменьшить объем АЗ и существенно улучшить основные параметры источника.

4. При использовании вращающейся мишени на основе природного урана можно:
— увеличить выход нейтронов в $\sim 1,4$ раза, соответственно, снизить умножение до ~ 36 ;

Таблица 5. Основные параметры нейтронного источника

Параметр	Значение
Мощность источника, МВт	8
Вид топлива	PuO ₂
Масса топлива, кг	130
Объем топлива, л	20
Материал мишени	W
Теплоноситель	H ₂ O
Частота повторения импульсов, с ⁻¹	30 (10)
Средний ток протонов, мА	0,083 (0,03)
Максимальный импульсный ток, мА	50
Мощность пучка протонов на мишени, МВт	0,1 (0,036)
Энергия протонов, ГэВ	1,2
Длительность импульса протонов, мкс	55 [40–200] (20)
Время жизни мгновенных нейтронов, с	0,5 · 10 ⁻⁶
Коэффициент размножения K _{эф}	0,98 (0,95)
Эффективная доля запаздывающих нейтронов β _{эф} , абс. ед.	2,165 · 10 ⁻³
Максимальное выгорание топлива, %	10
Оценка выгорания на перспективу, %	20
Средняя плотность потока тепловых нейтронов на поверхности плоского водяного замедлителя, см ⁻² · с ⁻¹	2,0(0,8) · 10 ¹⁴
Средняя плотность потока холодных нейтронов на поверхности ХЗ, см ⁻² · с ⁻¹ : при λ > 2,5 Å при λ > 4,0 Å	4,2 · 10 ¹³ 1,75 · 10 ¹³
Плотность потока тепловых нейтронов в импульсе, см ⁻² · с ⁻¹	5,3(6,2) · 10 ¹⁶
Длительность импульса тепловых нейтронов на полувысоте, мкс	Менее 125 (85)

Примечание. В круглых скобках приведены данные при частоте повторения импульсов 10 с⁻¹.

— за счет некоторого снижения потоков нейтронов перейти на умножение 20, что снизит фон между импульсами и позволит отказаться от модулятора реактивности вообще.

12. СРАВНЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НЕЙТРОННЫХ ИСТОЧНИКОВ, УПРАВЛЯЕМЫХ ПРОТОННЫМИ УСКОРИТЕЛЯМИ

Краткое описание оптимальных вариантов импульсных источников нейтронов на основе протонных ускорителей дано в работе [2]. Рассматриваемый в данной работе источник есть некоторый обобщенный оптимальный вариант. Существует другой подход и другое представление о перспективном источнике нейтронов вместо ИБР-2М. Речь идет о супербустере NEPTUN, названном так авторами этого предложения, для под-

критической сборки с АЗ на основе нитрида нептуния [6]. Для удобства дальнейшего сравнения в качестве условного названия для модели источника с АЗ на основе двуокиси плутония примем название PLUTON. Отличительной особенностью супербустера NEPTUN является то, что мишенью, генерирующей источник испарительных нейтронов, является сама АЗ. Супербустер NEPTUN включает в себя размножающую мишень с пустотной положительной обратной связью, источник PLUTON — однозонный бустер с АЗ на основе двуокиси плутония с внутренней мишенью. Как видно из вышесказанного, концепции рассматриваемых источников принципиально разные и, кроме ускорителя протонов, имеют мало точек соприкосновения. Естественно, что сравнение параметров этих источников имеет всесторонний интерес. Исходные данные (геометрия, структура, состав и т. д.) для расчета источника NEPTUN взяты из [6]. Других надежных данных по источнику NEPTUN не было. Расчетные модели PLUTON и NEPTUN представлены на рис. 15. В расчетной модели NEPTUN была детально прорисована конструкция АЗ, учтена гетерогенная структура загрузки твэлов, объемные доли конструкционных материалов, теплоносителя. В соответствии с описанием задавалась и окружающая АЗ структура: замедлители, отражатели и т. д. С помощью ММК были рассчитаны нейтронно-физические характеристики источника. Для оценки теплосъема проведены расчеты по термогидравлике. Значения плотности энерговыделения, используемые в расчетах теплосъема в PLUTON и NEPTUN, приведены на рис. 16 и 17. Параметры протонного пучка ускорителя задавались следующими: энергия протонов 1,2 ГэВ, средний ток 0,083 мА, мощность на мишени 0,1 МВт, частота повторения импульсов 30 с^{-1} , коэффициент размножения АЗ $K_{эф} = 0,98$ (умножение 50). Основная информация по сравнению источников представлена в табл. 6.

Как видно из табл. 6, в параметрах супербустера NEPTUN имеются несколько критических точек, отмеченных полужирным.

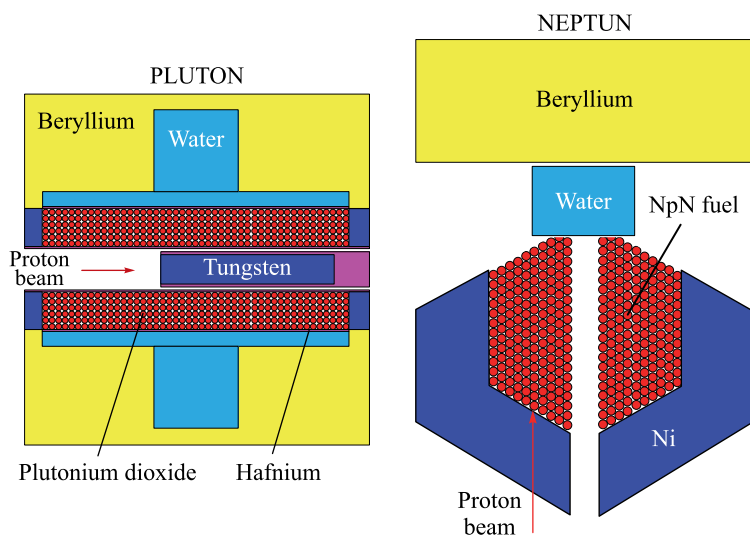


Рис. 15. Принципиальные расчетные модели, используемые для сравнения параметров PLUTON и супербустера NEPTUN

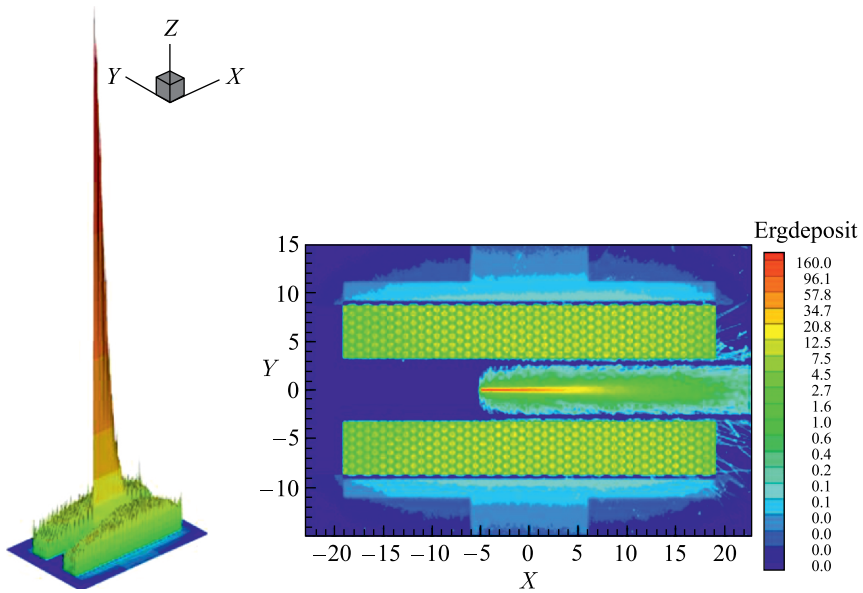


Рис. 16. Энерговывделение в мишени, АЗ и замедлителях, окружающих АЗ источника PLUTON

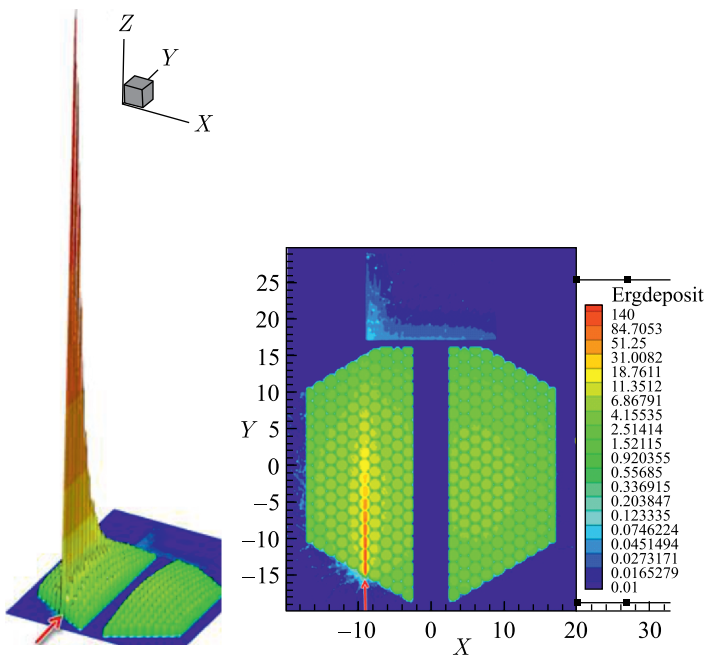


Рис. 17. Энерговывделение в АЗ и замедлителях, окружающих АЗ супербустера NEPTUN

Таблица 6. Основные параметры нейтронных источников PLUTON и NEPTUN (в скобках приведены значения параметров NEPTUN, представленные авторами в [6])

Параметр	Значение	
	PLUTON	NEPTUN
Тепловая мощность, МВт	8,0	10,0
Вид топлива	PuO ₂	NpN
Масса топлива, кг	130	300
Объем АЗ, л	20	32 (40)
Материал мишени	W	Материал АЗ
Охлаждение мишени	H ₂ O	Na
Охлаждение АЗ		
Максимальный подогрев теплоносителя в центральных твэлах, °С	75	300
Эффект реактивности при основной проектной аварии (потеря теплоносителя), % K _{эф}	- 3,0	+ 0,35
Фон между импульсами, %	3,5	3,2
Среднее число конверсионных нейтронов на один протон	24	28
Средняя плотность потока тепловых нейтронов на поверхности плоского водяного замедлителя, см ⁻² · с ⁻¹	20 · 10 ¹³	1,3 · 10¹³ (20 · 10¹³)

Таблица 7. Сравнительные данные расчета тепловой мощности и плотности потока тепловых нейтронов на поверхности плоского водяного замедлителя для источников PLUTON и NEPTUN при разном умножении

Параметр	Значение						
	PLUTON			NEPTUN			
	Pu + W-мишень			Np + АЗ-мишень			
Коэффициент размножения K _{эф}	0,95	0,98	0,99	0,98	0,99	0,995	0,998
Умножение K _{эф} /ΔK _{эф}	20	50	100	50	100	200	500
Тепловая мощность, МВт	4,5	8,0	16,2	10,0	19,0	37,0	93,0
Средняя плотность потока тепловых нейтронов на поверхности плоского водяного замедлителя, 10 ¹³ см ⁻² · с ⁻¹	8,20	20,00	28,00	1,35	2,60	5,20	12,48

• Во-первых, плотность нейтронного потока в NEPTUN в 10–15 раз меньше, чем у PLUTON. Этот разброс зависит от конструктивных особенностей источников.

• Во-вторых, температурные условия подогрева натриевого теплоносителя в некоторых точках АЗ при мощности 10 МВт находятся на пределе допустимых.

• В-третьих, основная проектная авария при потере теплоносителя проходит с положительным вводом реактивности.

• В-четвертых, предлагаемого в NEPTUN нитридного топлива NpN в настоящее время нет. С другим, менее плотным, топливом, содержащим нептуний, потоки тепловых нейтронов будут на уровне ~ 10¹² см⁻² · с⁻¹.

- В-пятых, как видно из рис. 17, локальные точки перегрева в зоне максимального энерговыделения от действия протонного пучка могут вызывать кипение натриевого теплоносителя со всеми вытекающими из этого факта последствиями.

- Чтобы увеличить плотность потока тепловых нейтронов супербустера NEPTUN, например, до уровня $1,25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, нужно повысить умножение до ~ 500 и фактически перейти в реакторный режим с повышением мощности установки до 93 МВт. Расчет изменения плотности потока тепловых нейтронов и мощности источников при изменении умножения приведен в табл. 7.

13. РАСПУХАНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Проблема распухания материалов в равной мере относится как к источнику NEPTUN, так и PLUTON. Проблема состоит в стойкости мишеней, подверженных воздействию высокоэнергетических протонов. Этот вопрос в данном разделе рассматривается только качественно, с учетом опыта Лос-Аламосской национальной лаборатории и источника ISIS [7].

При облучении протонами происходит распухание и растрескивание мишеней из вольфрама и в большей степени урана. Растрескивание происходит уже через два года даже при довольно слабом токе протонов 30 мкА. Тем не менее в мировой практике предпочтение отдается мишеням из вольфрама, средний срок службы которых, как показывает опыт, составляет два года. В большей степени это относится к установке PLUTON.

Проблема радиационных повреждений в установке NEPTUN также представляет большой интерес, поскольку корпус реактора и материал АЗ при облучении протонами испытывают высокие радиационные нагрузки. Тема радиационных повреждений является самостоятельной задачей и будет рассмотрена на стадии проработки проекта.

ВЫВОДЫ

Предлагаемая концепция импульсного источника нейтронов с плотностью потока тепловых нейтронов на уровне $2,0 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при мощности 8 МВт реализуема и попадает в категорию высокопоточных как в настоящее время, так и на перспективу. Источник — глубоко подкритическая система с высоким уровнем ядерной безопасности. Мощность протонного пучка при энергии протонов 1,2 ГэВ на вольфрамовой мишени составляет 0,1 МВт, что более чем на порядок ниже мощности современных ускорителей для пучковых нейтронных источников.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Е. А. Жаворонковой и Д. Сумхуу за помощь в расчетах и оформлении статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ананьев В. Д., Пепельшев Ю. Н., Rogov A. D.* Расчеты по оптимизации реактора ИБР-2. Препринт ОИЯИ Р13-2017-43. Дубна, 2017.
2. *Пепельшев Ю. Н., Rogov A. D., Сидоркин С. Ф.* Расчеты по оптимизации нейтронно-физических характеристик размножающих импульсных источников нейтронов на основе протонного ускорителя. Препринт ОИЯИ Р13-2018-28. Дубна, 2018.

3. Åberg M., Ahlfors N. et al. ESS Technical Design Report ESS-0016915. 2013; <https://europeanspallationsource.se>.
4. Anderson D., Bechtol D. et al. Technical Design Report ORNL 2015/24. 2015; <https://neutrons.ornl.gov/sns>. The Spallation Neutron Source (SNS).
5. Klinkby E., Zanini L., Batkov K., Mezei F., Schönfeldt T., Takibayev A. Neutron Moderators for the European Spallation Source, Physics of Fundamental Symmetries and Interactions // PSI-2016, PSI, Zurich, Oct. 16–20, 2016.
6. Шабалин Е. П., Аксенов В. Л., Комышев Г. Г., Rogov A. Д. Высокопоточный импульсный исследовательский реактор на основе нептуния. Препринт ОИЯИ Р13-2017-27. Дубна, 2017.
7. Carpenter J. M., Hins A. G. Experience with IPNS Targets // Proc. of ICANS-12, May 24–28, 1993. U.K. RAL Report Number 94-025.
8. Сидоркин С. Ф., Коптелов Э. А., Rogov A. Д. Предложение по ADS — установке на основе линейного ускорителя ИЯИ РАН. Препринт ИЯИ РАН 1245/2009. М., 2009.
9. Sidorkin S. F., Rogov A. D., Ponomarev L. I., Koptelov E. A. Proposal of the ADS Research Stand Based on the Linac of the Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences // Proc. of Conf. “Thorium Energy for the World” (ThEC13), CERN, Globe of Science and Innovation, Geneva, Switzerland, Oct. 27–31, 2013. P. 311–326.

Получено 14 февраля 2019 г.