

УДК 621.039.55

КОНЦЕПЦИЯ ДУБНЕНСКОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ ЧЕТВЕРТОГО ПОКОЛЕНИЯ

© 2018 г. В. Л. Аксенов^{1, 2,*}, Е. П. Шабалин²

¹НИЦ “Курчатовский институт”, 123182 Москва, Россия

²Объединенный институт ядерных исследований, 141980 Дубна, Московская область, Россия

*E-mail: aksenov@nf.jinr.ru

Поступила в редакцию 12.01.2018 г.

Излагаются принципы конструкции подкритической размножающей нейтроны системы с модуляцией реактивности, которая может использоваться как мишень супербустера с линейным протонным ускорителем. Расчеты показывают, что можно ожидать на выходе плотность потока нейтронов в импульсе до $10^{17} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и, в среднем, до $2 \times 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Длительность импульса тепловых нейтронов может быть 200–300 и 20–30 мкс в зависимости от замедлителя при соответствующих длительностях импульса протонного ускорителя.

Ключевые слова: нейтронные источники, импульсные источники нейтронов, модуляция реактивности, подкритическая сборка, супербустер, линейный протонный ускоритель.

DOI: 10.7868/S0207352818070028

ВВЕДЕНИЕ

Исследовательский ядерный импульсный реактор периодического действия на быстрых нейтронах ИБР-2 успешно работает с 2012 г. второй срок после модернизации [1]. Этот источник нейтронов третьего поколения имеет самую высокую в мире плотность потока нейтронов в импульсе и в настоящее время является единственным в стране источником нейтронов для исследований на выведенных пучках мирового класса [2]. Реакторная установка, комплекс технологического оборудования и здание выработают свой окончательный ресурс в зависимости от режима эксплуатации в 2032–37 гг. В связи с этим возникает ряд вопросов для обсуждения.

Прежде всего, нужен ли вообще новый источник, или, шире, нужны ли будут нейтроны для физических исследований через 20–30 лет? Этот, на первый взгляд, нелепый вопрос не лишен оснований. Дело в том, что в последние два десятилетия большое развитие получили многие физические методы исследования структуры и свойств вещества. В комплементарной области это относится, в первую очередь, к рентгеновским лазерам на свободных электронах, которые открывают совершенно фантастические возможности. Поэтому необходимо сформулировать научные задачи, для решения которых нейтроны могут дать оригинальные возможности, причем через 20–30 лет. Этому вопросу был посвящен доклад одного из авторов

на заседании Программного комитета ОИЯИ по физике конденсированного вещества в январе 2017 года [3]. Анализ горизонтов нейтронных исследований показывает, что для решения поставленных задач необходим импульсный источник со средней плотностью потока тепловых нейтронов Φ_n^T не меньше $10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Далее будем рассматривать эту оценку как ближний рубеж для нового источника. В этой связи отпадает вопрос о возможности использования проекта действующего реактора ИБР-2. В [4] показано, что передел возможностей реактора ИБР-2 ограничен значением $\Phi_n^T = 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Следующий волнующий общественность вопрос – нужен ли будет новый источник нейтронов в Европе? Этот вопрос активно обсуждается в ведущих Европейских нейтронных центрах, причем в различных аспектах. Во-первых, было отмечено, что время реализации крупных проектов увеличивается и может дойти до 50 лет [5]. Поэтому предлагается уже сегодня обсуждать новый источник, который придет на смену Европейскому испарительному источнику (ESS – European Spallation Source). Предлагается источник типа ESS с двумя мишенями. Продуктивная идея состоит в том, что длительность импульса протонного ускорителя должна совпадать с длительностью нейтронного импульса после замедлителя. В [6] предлагается развивать проект источника нейтронов на основе инерционного ядерного синтеза в надежде, что

через 20–30 лет будут развиты необходимые технологии для получения нужных потоков медленных нейтронов. В [7] для получения высоких потоков нейтронов в качестве мишени для протонного ускорителя предложено использовать каскадную размножающую систему. В основу положены разработки ВНИИТЭФ (г. Саров) [8, 9], где имеется большой опыт в этой области. И, наконец, в Юлихе [10] начинает реализовываться проект источника средней мощности на основе ядерной реакции срыва при столкновении дейтрона с бериллием в общей стратегии создания сети национальных источников малой и средней мощности дополнительно к суперисточникам типа ESS.

В настоящем сообщении представлено конкретное предложение по созданию источника нейтронов четвертого поколения на основе протонного ускорителя и подкритической размножающей системы с модуляцией реактивности (супербустера).

МИШЕНЬ С РАЗМНОЖЕНИЕМ ДЛЯ СУПЕРБУСТЕРА

Первый бустер (ускоритель и мишень с размножением) для производства нейтронов был сооружен в 1959 г. в Харуэлле на основе ускорителя электронов. В Дубне бустер такого типа, но с модуляцией реактивности подкритической системы (супербустер) был создан в 1964 г. на основе импульсного реактора ИБР (первое поколение) и микродрона, а затем в 1969 г. — на основе линейного ускорителя электронов и импульсного реактора ИБР-30 (второе поколение). Установка ИБР-30 (выведена из эксплуатации в 2001 г.) могла работать как в режиме пульсирующего реактора, так и в режиме супербустера.

Преимущество бустера перед системой “ускоритель + мишень без размножения” состоит в том, что тот же поток нейтронов можно получить с более простым и более дешевым ускорителем. Использование же супербустера позволяет работать при значительно большем коэффициенте размножения нейтронов в импульсе, чем в случае бустера, и дополнительно снизить требования к параметрам ускорителя. Этот фактор особенно существенен при генерации коротких (20–30 мкс) импульсов тепловых нейтронов. Супербустер может работать и как самостоятельный импульсный реактор.

В [11] показано, что импульсные источники медленных нейтронов на основе реакции деления (импульсные реакторы и супербустеры) могут быть конкурентоспособными по отношению к нейтронпроизводящим неразмножающим мишеням сильнооточных протонных ускорителей (spallation neutron sources) и даже значительно, на порядок, превосходить их по пиковым потокам

медленных нейтронов при использовании уже освоенных ядерных технологий. Средняя по времени векторная плотность потока тепловых нейтронов может достигать $2\text{--}3 \times 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (в пересчете на угол 2π — так называемый 2π -эквивалент) при мощности реактора 15–20 МВт. В то же время увеличить этот параметр невозможно, т.е. это предел нейтронных потоков в импульсных источниках на основе деления. Дело в том, что плотность потока исследовательского реактора на выведенных пучках определяется не полной тепловой мощностью, а удельной энергонапряженностью (удельным съемом тепла).

В режиме супербустера при невысоких параметрах ускорителя (ток протонов в импульсе до 50 мА, энергия протонов 1 ГэВ, частота 10–30 Гц, мощность пучка до 100 кВт) предлагаемый источник будет обеспечивать пиковую плотность потока нейтронов до $10^{17} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, что на порядок выше, чем в случае ESS с мощностью пучка протонов 5 МВт, а среднюю по времени плотность потока — до $2 \times 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (в ESS — до $3 \times 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$).

Для выбора конструкции мишени и обоснования ее безопасности очень важен опыт эксплуатации реактора ИБР-2. Еще при проектировании ИБР-2 в 60-х годах XX века были изучены предельные возможности пульсирующего ядерного реактора для исследований в области физики конденсированных сред. Было показано, что наилучшие параметры нейтронных пучков тепловых нейтронов обеспечивает реактор на быстрых нейтронах с объемом активной зоны 15–20 л при средней тепловой мощности не менее 10 МВт [12]. В то время единственным действующим импульсным реактором был ИБР — маломощный (1–3 кВт), охлаждаемый воздухом реактор с металлическим плутонием, созданный в Дубне в 1960 году. Считалось рискованным идти на создание реактора с предельными нагрузками, превышающими ИБР в тысячи раз, и реактор ИБР-2 был спроектирован на мощность 4 МВт. В итоге же пределом рабочего режима ИБР-2 стала мощность 2 МВт. Тем не менее, реактор ИБР-2 в течение более 30 лет (с 1984 года) был и пока еще остается самым высокопоточным источником тепловых нейтронов для исследований на выведенных пучках, обеспечивающим пиковую плотность потока нейтронов на поверхности внешнего замедлителя до $10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и среднюю плотность потока до $10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

С учетом всего вышесказанного, предлагается [13] конструкция размножающей мишени с модулятором реактивности (рис. 1). Принципиальные отличия от реактора ИБР-2 — в выборе ядерного топлива, модулятора реактивности и расположении замедлителей. Рассмотрим последовательно эти отличия.

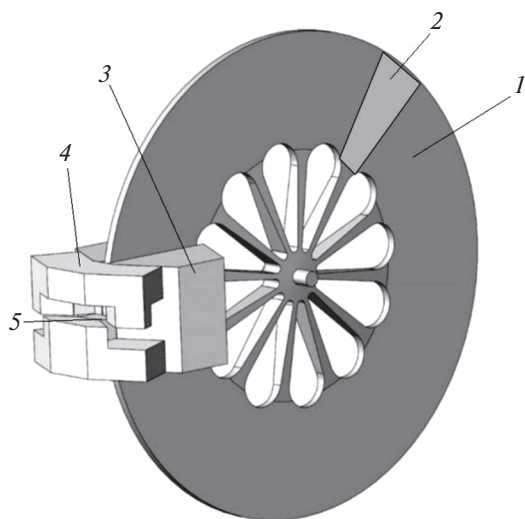


Рис. 1. Схема размножающей мишени с модулятором реактивности: 1 – диск – модулятор реактивности; 2 – пустой сектор в диске; 3 – активная зона с отражателем; 4 – бериллиевый отражатель; 5 – замедлители.

ТОПЛИВО ДЛЯ МИШЕНИ

В качестве основы для топлива предлагается использовать изотоп нептуний-237. Применение этого изотопа детально описано в монографии [8]. Главная особенность изотопа ^{237}Np в отличие от традиционных ядерных композиций на основе ^{235}U и ^{239}Pu – это пороговый характер сечения деления. Существенно, что эффективный порог деления – около 0.4 МэВ, что на 0.2 МэВ ниже порога деления ^{238}U . Это обеспечивает создание критической массы при достаточной плотности ядер нептуния [14, 15].

Важных следствий, как минимум, три. Во-первых, время жизни поколения мгновенных нейтронов τ в зоне с нептунием значительно ниже, чем в зоне с плутонием. Так, в действующем исследовательском реакторе на быстрых нейтронах ИБР-2 τ равно 65 нс, в реакторах на промежуточных нейтронах составляет несколько микросекунд, в то время как в нептуниевом реакторе – от 3 до 10 нс, в зависимости от объемной плотности ядерного топлива в активной зоне. Этот фактор позволяет получить более короткую вспышку быстрых (и, соответственно, тепловых) нейтронов в режиме работы пульсирующего реактора и более высокую мощность при заданной длительности импульса тепловых нейтронов для режима бустера.

Во-вторых, эффективная доля запаздывающих нейтронов $\beta_{\text{эфф}}$ оказывается заметно ниже, чем в случае плутония, и для ИБР-2 равна 2.16×10^{-3} на один мгновенный нейтрон деления. Дело в том, что запаздывающие нейтроны деления имеют энергию 0.2–0.8 МэВ при средней энергии

0.4 МэВ, равной как раз энергии порога деления ^{237}Np [11–13]. Вследствие этого при физической доле запаздывающих нейтронов нептуния 4×10^{-3} их эффективная доля составляет всего 1.6×10^{-3} . Низкое значение $\beta_{\text{эфф}}$ определяет малую фоновую мощность в промежутках между импульсами (как в режиме импульсного реактора, так и в режиме супербустера), а также позволяет работать с более высоким коэффициентом умножения в режиме супербустера. Для уранового бустера предельный коэффициент умножения составляет ~ 150 , для плутониевого – ~ 450 , а для нептуниевого – ~ 600 . Уровень фона в обратной пропорции увеличивается от нептуния к урану.

И третье следствие порогового характера деления нептуния – это возможность использования для изготовления модулятора реактивности материалов, замедляющих нейтроны. Замедление на ядрах водорода с высоким сечением рассеяния (около 4 барн для спектра деления) и сбросом энергии нейтрона в среднем на 50% на одно рассеяние приводит к быстрому выводу нейтрона из зоны деления нептуния. По сути, водород в нептуниевой зоне “работает” как поглотитель нейтронов (точнее, как “поглотитель ценности” нейтронов). Расчеты показывают, что удаление водородсодержащего вещества (например, гидрида титана) из активной нептуниевой зоны дает изменение реактивности, сравнимое с вводом делящегося вещества. Такого эффекта нельзя достичь перемещением эквивалентного объема отражателя.

Помимо порогового характера деления, нептуниевое ядерное топливо обладает еще одним замечательным свойством – при работе такого подкритического реактора на мощности не будет снижения коэффициента размножения вследствие выгорания нептуния, что обычно для реакторов на уране и плутонии, а напротив, запас реактивности реактора будет даже увеличиваться с выгоранием нептуния. Объяснение простое: при захвате нейтрона ядром ^{237}Np возникает β -радиоактивное ядро ^{238}Np , которое с периодом полураспада 2.12 дня превращается в ядро ^{238}Pu . Последнее является непороговым делящимся изотопом, делящиеся свойства которого значительно лучше, чем ^{237}Np . В [12] предложено использовать нитрид нептуния, физические и теплофизические свойства которого хорошо изучены [16–18]. Нитриды актиноидов и нитрид нептуния в частности обладают весьма привлекательными свойствами для их использования в качестве ядерного топлива – высокой плотностью и хорошей теплопроводностью. Свойства нитрида нептуния достаточно интенсивно исследуются в последние два десятка лет в связи с проблемой трансмутации радиоактивных отходов.

АКТИВНАЯ ЗОНА

Активная зона мишени и стационарный отражатель охлаждаются свинцово-висмутовым эвтектическим сплавом, поступающим в сосуд реактора снизу. Использование свинца по ряду причин предпочтительнее натрия: меньше критическая масса нептуния, ниже температура тепловыделяющего элемента (ТВЭЛа), и главное – отрицательный пустотный коэффициент реактивности. Там же находится опорная плита для крепления сборок ТВЭЛов, которые загружаются сверху. С целью снижения критического объема реактора наилучшими были бы ТВЭЛы пластинчатого типа с топливным сердечником толщиной 10 мм. Наружная поверхность пластинчатых ТВЭЛов должна иметь выступы для интенсификации теплообмена и дистанционирования пластин. При средней тепловой мощности реактора 15 МВт необходимый коэффициент теплоотдачи $250 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$. Однако при современной технологии изготовления более практичными выглядят цилиндрические ТВЭЛы, при использовании которых для сохранения заявленного потока тепловых нейтронов мощность реактора нужно будет увеличить на 15–20%.

Управление системой осуществляется подвижными элементами бокового никелевого отражателя, обеспечивающими до 1.5% компенсации реактивности. При учете малости эффекта реактивности от выгорания нептуния такая глубина регулирования достаточна. Роль аварийной защиты будут выполнять блоки бериллиевого отражателя.

Критическая загрузка нептуниевой зоны при максимально возможной объемной доле нитрида 70% составляет по расчету около 350 кг. Объем активной зоны при этом около 40 л. Плотность потока тепловых нейтронов из замедлителей растет с увеличением объема зоны, однако удельная плотность потока на единицу мощности реактора падает, и тем быстрее, чем больше объем [11]. Поэтому выгоднее работать не с таким большим объемом активной зоны. Так, снижение объема до 30 л приводит, согласно данным той же работы, только к 5%-му снижению плотности потока, а мощность установки снижается на 33%.

МОДУЛЯТОР РЕАКТИВНОСТИ

Модулятор реактивности выполнен в виде вращающегося диска, периферийная область которого изготовлена из гидрида титана, вещества с высоким содержанием водорода, в форме радиальных секторов. Один из секторов сделан пустым, так что при вхождении этого сектора в область активной зоны реактора коэффициент размножения нейтронов возрастает вследствие смещения спектра в более жесткую область – увеличения энергии нейтронов. Использование такого модулятора обеспечивает более глубокую модуляцию реактивности,

чем подвижный отражатель (примерно в два раза). При плотности гидрида титана в секторах модулятора реактивности 3.5 г/см^3 (компактный гидрид титана имеет плотность 3.8 г/см^3) глубина модуляции реактивности составит не менее 4% от $k_{\text{эфф}}$ ($k_{\text{эфф}}$ – эффективный коэффициент размножения нейтронов), при этом фоновая мощность реактора не превысит 4% от средней мощности.

ЗАМЕДЛИТЕЛИ НЕЙТРОНОВ

В конструкции мишени принята компоновка замедлителей нейтронов типа “крылья” (wings в англоязычной литературе) – замедлители располагаются так, чтобы светящаяся поверхность была ориентирована ортогонально поверхности активной зоны. Эта мера снижает поток быстрых нейтронов и гамма-квантов в сторону выведенных пучков примерно в три раза по сравнению с радиальным расположением замедлителей. Предлагается установить три сборки замедлителей на двух горизонтальных уровнях (рис. 2, 3). Каждая сборка будет иметь две светящиеся поверхности и, соответственно, состоять из двух отличающихся замедляющих сред. Подобная компоновка обеспечивает вывод не менее 20 нейтронных пучков разного спектрального состава и разной длительности импульса. При использовании обсуждаемого импульсного источника нейтронов в режиме импульсного реактора (без ускорителя) все замедлители ориентированы на длинный импульс тепловых и холодных нейтронов (200–300 мкс) с максимальной пиковой плотностью потока до $(0.6–0.7) \times 10^{17} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и средней плотностью

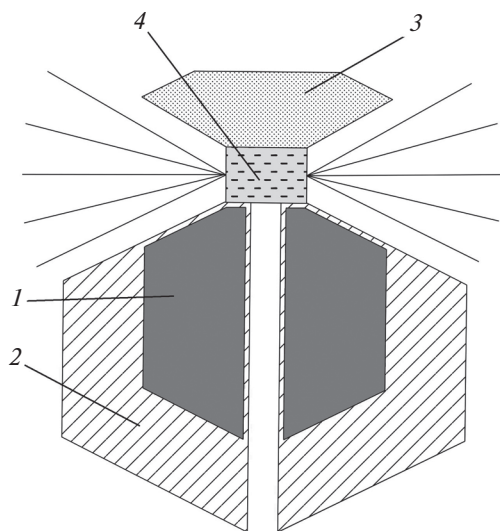


Рис. 2. Расположение замедлителя на первом уровне: 1 – активная зона $\text{Np} + \text{Pb} + \text{Bi}$; 2 – отражатель из никеля; 3 – замедлитель; 4 – бериллиевый отражатель.

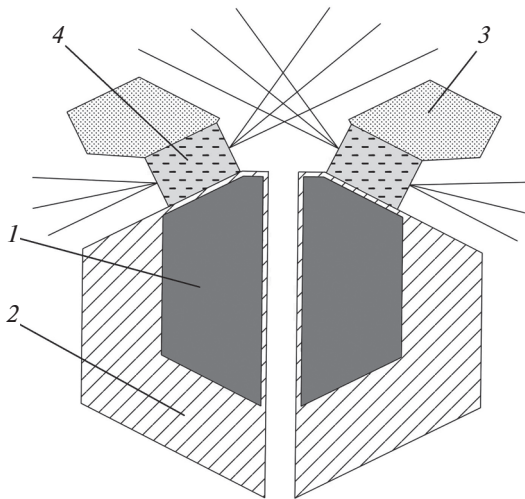


Рис. 3. Расположение замедлителей на втором уровне. Обозначения те же, что и на рис. 2.

$(0.5-2) \times 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (величина потока в указанном диапазоне определяется видом и расположением соответствующего блока замедлителя и направлением пучка нейтронов).

При использовании обсуждаемого импульсного источника нейтронов в режиме супербустера, т.е. размножающей нейтронпроизводящей мишени протонного ускорителя с модулятором реактивности, можно ввести один-два замедлителя с малым временем жизни тепловых нейтронов 15–20 мкс (тонкие водяные замедлители толщиной 15–25 мм или отравленные замедлители на основе воды с гомогенной или гетерогенной добавкой поглощающего нейтроны вещества). В сочетании с коротким импульсом протонов и умножением нейтронного потока в активной зоне в 300–500 раз длительность результирующего импульса тепловых нейтронов будет $\sim 200-300$ мкс с соответствующим выигрышем в интенсивности пучка нейтронов при малом энергетическом разрешении. При этом пучки нейтронов из толстого неотравленного замедлителя сохраняют высокий пиковый поток – такой же, как в режиме реактора. Источник станет универсальным, обеспечивающим наилучшие условия проведения экспериментов одновременно на всех спектрометрах.

ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Кинетика и динамика системы, а также вопросы ядерной безопасности рассмотрены в [12]. Отметим только два момента. В случае использования активной зоны на основе нептуния как нейтронпроизводящей мишени протонного ускорителя (режим супербустера) влияние флуктуаций реактивности на энергию импульсов мощность ничтожно мало – в сотни раз слабее, чем в режиме импульсного реактора. Ведущую роль в генерации

нейтронных вспышек играет тогда ток протонов ускорителя, а обратная связь “температура топливного сердечника–ток протонов” отсутствует по естественным причинам.

Отличительная особенность системы с нептунием состоит в том, что выбранный тип модулятора реактивности принципиально не может внести положительную реактивность при любых неисправностях и поломках вследствие расположения в области максимальной реактивности, а также благодаря радиальной симметрии диска. Существенно также, что компактный гидрид титана не воспламеняется. Безопасность установок во многом определяется также использованием свинцового сплава в качестве хладагента: слив свинца из активной зоны дает отрицательный эффект реактивности. К положительному эффекту реактивности приводит лишь слив воды из замедлителей вследствие смещения спектра нейтронов в более жесткую область, но из-за наличия бериллиевого отражателя за замедлителями этот эффект незначителен – не более 0.01% от $k_{эфф}$. При медленной утечке воды (за время более 1 с) вводимая реактивность будет полностью компенсироваться температурным эффектом реактивности, и даже в случае быстрого опорожнения всех трех камер замедлителя в течение 0.1 с импульс мощности возрастет лишь в несколько раз, что обсуждалось выше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные параметры мишени, производящей нейтроны, представлены в таблице. Как видно из таблицы, предлагаемый источник нейтронов обладает целым рядом преимуществ, помимо того, что он будет давать потоки нейтронов в импульсе на порядок больше существующих и сооружаемых на сегодняшний день. Это очень экономичная установка, поскольку за счет большого коэффициента умножения нейтронов в мишени существенно сокращаются расходы на ускоритель. Использование нептуния, кроме того, что это не оружейный материал, дает возможность работать без перезагрузки топлива в течение 15–20 лет. Самое главное преимущество (при рекордных потоках) состоит в возможности иметь на супербустере одновременно каналы с длинными (200–300 мкс) и короткими (20–30 мкс) импульсами тепловых нейтронов при сохранении величины среднего потока.

Последнее обстоятельство весьма существенно, так как для проведения экспериментов по рассеянию помимо основных характеристик – средней по времени плотности потока нейтронов и частоты повторения импульсов – важна также длительность импульса. В соответствии с экспериментальными методами и спецификой применения разделяют источники с коротким импульсом (оптимально 20 мкс) и с длинным импульсом (оптимально

Таблица. Основные параметры мишени

Средняя по времени плотность потока тепловых нейтронов, (зависит от расположения и типа замедлителя)	$(0.5-2) \times 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
Пиковая плотность потока тепловых нейтронов	до $10^{17} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
Полуширина импульса быстрых/тепловых нейтронов:	
в диапазоне длинных импульсов	100–300 мкс
в диапазоне коротких импульсов	20–30 мкс
(зависит от длительности импульса протонов и типа замедлителя)	
Частота импульсов:	
в режиме длинных импульсов	10 Гц
в режиме коротких импульсов	30 Гц
Фоновая мощность в долях от средней мощности	3.2%
Число нейтронных пучков	20–22
Тепловая мощность	до 15 МВт
ТВЭЛ	Пластинчатого типа (сердечник 10 мм с жидким свинцовым подслоем 0.3 мм) трубчатые (сердечник 13–14 мм).
Максимальная температура топлива	1500 К
Температура теплоносителя (эвтектика свинец–висмут)	200–500 °С
Расход теплоносителя (при мощности 10 МВт)	80 м ³ /ч
Ресурс реактора (по корпусу активной зоны и ТВЭЛа)	20–25 тыс. МВт · сут
Загрузка нитрида нептуния:	
без добавки плутония	350 кг
с добавкой ²³⁹ Pu в количестве, 10%	185 кг
Начальный запас реактивности холодной зоны	0.4% $k_{эфф}$
Наибольший положительный эффект реактивности (слив воды)	0.01% $k_{эфф}$
Параметр параболы реактивности	$10^{-4} k_{эфф}$
Полная эффективность модулятора реактивности	4.4% $k_{эфф}$
Время жизни поколения мгновенных нейтронов	10 нс
Импульсная надкритичность	$1.2 \times 10^{-4} k_{эфф}$
Эффективная доля запаздывающих нейтронов	$1.6 \times 10^{-3} k_{эфф}$
Импульсная доля запаздывающих нейтронов (в режиме реактора):	
при малой мощности	$3 \times 10^{-5} k_{эфф}$
при номинальной мощности	$7 \times 10^{-5} k_{эфф}$

200 мкс) тепловых нейтронов, в ESS длительность импульса равна 2800 мкс. Для реализации современной научной программы (например, [3]) желательно иметь обе опции при средней плотности потока не менее $10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Проект может иметь развитие, если к линейному ускорителю протонов пристроить накопитель и мишень для получения очень коротких импульсов (1–100 нс) для ядерной спектроскопии высокого разрешения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ананьев В.Д., Виноградов А.В., Долгих А.В. и др.* Энергетический пуск модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М). Сообщение ОИЯИ P13-2012-42, Дубна, 2012. 25 с.
2. *Аксенов В.Л., Балагуров А.М.* // УФН. 2016. Т. 186. № 3. С. 293.
3. *Aksenov V.L.* A 15-Year Forward Look at Neutron Facilities in JINR. JINR Communications, E3-2017-12, Dubna, 2017.
4. *Ананьев В.Д., Пепельшев Ю.Н., Рогов А.Д.* Вопросы атомной науки и техники: Сер. Физика ядерных реакторов. В печати.
5. *Andersen K.H., Carlile C.J.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 746. P. 012030.
6. *Taylor A., Dunne M., Bennington S. et al.* // Science. 2007. V. 315. Iss. 5815. P. 1092.
7. *Аксенов В.Л., Балагуров А.М., Пепельшев Ю.Н., Рогов А.Д.* // Вопросы атомной науки и техники: Сер. Физика ядерных реакторов. 2017. Вып. 2. С. 4.
8. *Колесов В.Ф.* Аперiodические импульсные реакторы. Т. 1. Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. 553 с.
9. *Колесов В.Ф.* Аперiodические импульсные реакторы. Т. 2. Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. 557 с.
10. *Rücker U., Croner T., Voigt J. et al.* // Eur. Phys. J. Plus. 2016. V. 131. P. 19.
11. *Aksenov V.L., Ananiev V.D., Komyshev G.G., Rogov A.D., Shabalin E.P.* // Phys. Particles Nuclei Lett. 2017. V. 14. № 5. P. 788.
12. *Шабалин Е.П., Погодаев Г.Н.* К вопросу оптимизации импульсного реактора на быстрых нейтронах. Сообщение ОИЯИ 2708, 1966. 19 с.
13. *Шабалин Е.П., Аксенов В.Л., Комышев Г.Г., Рогов А.Д.* // Атомная энергия. В печати.
14. *Seifritz W., Wydler P.* // Nucl. Sci. Engin. 1979. V. 72. № 2. P. 272.
15. *Sanchez R., Loaiza D., Kimpland R. et al.* // JAERI—Conf. 2003—019. P. 201.
16. *Хайд Э., Перлман И., Сиборг Г.* Ядерные свойства тяжелых элементов. Вып. 1. Трансурановые элементы. М.: Атомиздат, 1967. 264 с.
17. *Конов В.Н.* Нептуний—237. Свойства, структура сплавов и соединений. Препринт № 11(68), М.: ВНИИНМ, 1981. 14 с.
18. *Алексеев В.Л., Зайцев В.А.* Нитридное топливо для ядерной энергетики. М.: Техносфера, 2013. 240 с.

Conception of Dubna Neutron Source of the Fourth Generation

V. L. Aksenov, E. P. Shabalin

The principles of the design of a subcritical neutron multiplying system with reactivity modulation are described, which can be used as a target in a superbuster with a linear proton accelerator. Calculations show that the peak neutron flux density in a pulse can be expected to reach up to $10^{17} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, on average, $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$. The pulse duration of thermal neutrons can be 200–300 and 20–30 μs depending on the moderator and the corresponding pulse duration of the proton accelerator.

Keywords: neutron sources, pulsed neutron sources, modulation of reactivity, subcritical assembly, superbuster, linear proton accelerator.