

P13-2017-43

В. Д. Ананьев, Ю. Н. Пепельшев, А. Д. Рогов

РАСЧЕТЫ ПО ОПТИМИЗАЦИИ РЕАКТОРА ИБР-2

Направлено в журнал «Вопросы атомной науки и техники».
Серия «Физика ядерных реакторов»

Рассматривается нейтронно-физический аспект оптимизации реактора ИБР-2: можно ли в принципе создать импульсный реактор с повышенной плотностью потока нейтронов в пучках, а если можно — то насколько повышенной? Расчеты показали, что плотность потока тепловых нейтронов в пучках реактора теоретически можно повысить до $(2,0-2,5) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, а холодных нейтронов — почти на три порядка. Показано, что повышение плотности потока тепловых и холодных нейтронов возможно только при полном изменении конструкции реактора: уменьшении объема активной зоны, замене типа топлива на более плотное и изменении системы вывода пучков с радиальной на тангенциальную. Техническая реализация указанных требований для такого типа реактора является проблемой. В итоге конструкция ИБР-2, разработанная НИКИЭТ им. Н. А. Доллежала еще в 1968 г. для генерации коротких импульсов тепловых (нехолодных) нейтронов с средней плотностью потока на уровне $\sim 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, оптимизирована удивительно удачно.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2017

The neutron-physical aspect of optimization of the IBR-2 pulsed reactor is considered in respect of whether it is possible in principle to design and construct reactor with a higher neutron flux density in beams, and if yes, how much higher it could be? The calculations have shown that the thermal neutron flux density in the beams can theoretically be increased up to $(2.0-2.5) \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, and the cold neutron flux can be enhanced by three orders of magnitude. It is shown that the increase in the flux density of thermal and cold neutrons is possible only if the reactor design is changed completely (decrease in the core volume, replacement of the fuel type with a denser one, and change in the system of beam extraction from the radial to tangential one). The technical implementation of these requirements for a such type of the reactor poses a significant problem. To sum up, the IBR-2 design developed by NIKIET in 1968 for generating short pulses of thermal (not cold) neutrons with an average flux density of $\sim 10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ was surprisingly well optimized.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2017

ВВЕДЕНИЕ

Импульсная ядерная установка ИБР-2 с импульсным реактором ИБР-2М, действующим в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ (Дубна, Россия) с 2012 г. при средней мощности 2 МВт с длительностью вспышки 200 мкс, предназначена для проведения научных исследований на выведенных нейтронных пучках [1, 2]. Реактор ИБР-2М является модернизированной версией реактора ИБР-2, остановленного в 2006 г. в связи с выработкой ресурса. В свою очередь, ресурс работы ИБР-2М при существующем темпе энерговыработки рассчитан до 2042 г. [3]. В настоящее время прорабатывается концепция нового источника нейтронов взамен ИБР-2М [4, 5]: размножающие и не размножающие мишени, управляемые ускорителем протонов, а также различные версии реактора типа ИБР-2. С учетом тенденции развития современной науки параметры выведенных пучков нейтронного источника должны превышать параметры ИБР-2. В первую очередь это относится к средней плотности потока нейтронов, которая должна быть на уровне $10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, что на порядок выше, чем у ИБР-2. Здесь необходимо отметить следующее: импульсные реакторы успешно работают в ОИЯИ с 1960 г. Естественно, возникает вопрос: можно ли как-то оптимизировать реактор ИБР-2М с целью повышения плотности потока нейтронов в пучках? Ответ можно дать только после решения комплексной оптимизационной задачи с учетом множества ограничений, в том числе специфических для ИБР-2, таких как запас устойчивости, уровень флуктуаций энергии импульсов, динамическая неустойчивость и т. д. В работе рассматривается только один аспект этой сложной задачи — нейтронно-физический: можно ли в принципе на реакторе типа ИБР-2 повысить плотность потока нейтронов в пучках, а если можно — то насколько?

1. ИДЕЯ ОПТИМИЗАЦИИ И РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ИБР-2М

В качестве базовой версии реактора, подлежащей оптимизации, используем действующий в настоящее время модернизированный реактор ИБР-2М [2]. Принцип генерации импульсов нейтронов в модернизированном

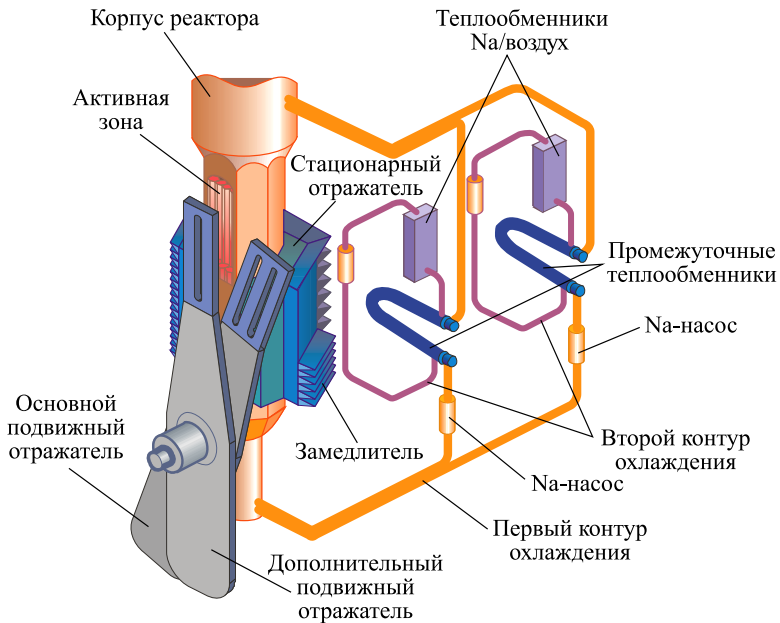


Рис. 1. Принципиальная схема реактора ИБР-2М с лопастями подвижного отражателя

реакторе остался прежним. Вращающийся вблизи активной зоны модулятор реактивности создает импульсы реактивности. В результате реактор с частотой 5 с^{-1} на короткое время (примерно 450 мкс) становится надкритическим на мгновенных нейтронах, оставаясь глубоко подкритическим основную часть периода. Вследствие этого реактор генерирует импульсы мощности с длительностью вспышки 200 мкс с периодом 0,2 с. Средняя мощность реактора составляет 2 МВт, пиковая мощность — 1830 МВт. Активная зона реактора охлаждается жидким натрием. Принципиальная схема реактора ИБР-2М приведена на рис. 1.

Активная зона ИБР-2М окружена замедлителями, поверхность которых «просматривается» 14 нейтронными каналами (см. рис. 2). Экспериментальный зал с выведенными в него нейтронными пучками, где размещаются спектрометры, расположен за двумя слоями бетонной биологической защиты. Между слоями защиты находится так называемый кольцевой коридор, в котором располагается различное оборудование, необходимое для формирования нейтронных пучков, например, прерыватели, коллиматоры, зеркальные нейтроноводы и т.д. Минимальное расстояние от поверхности замедлителя до места расположения оборудования или начала зеркальных нейтроноводов при такой системе вывода нейтронных пучков составляет 3 м, т.е. начинается непосредственно за первой биологической защитой.

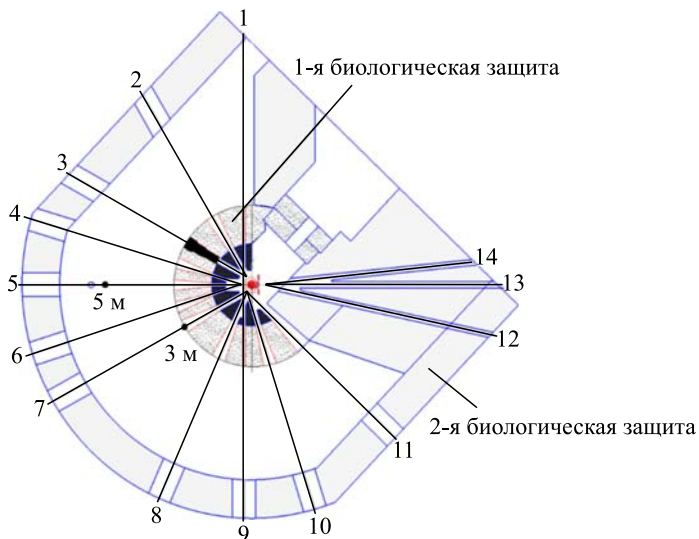


Рис. 2. Схема расположения нейтронных пучков и кольцевого коридора реактора ИБР-2М. Цифрами указаны номера нейтронных пучков

Оптимизировать ИБР-2М с целью достижения максимально возможной плотности потока нейтронов на образце Φ_{sample} в пучковых экспериментах (когда образец находится на достаточно большом расстоянии (метры) от реактора), можно различными путями.

Общее направление возможного повышения плотности потока нейтронов на образце можно задать следующим образом. Полное число «свободных» нейтронов (нейтронов, не участвующих в поддержании цепной реакции), образовавшихся в секунду в активной зоне быстрого реактора мощностью W [Вт], вычисляется следующим образом:

$$\varphi [\text{с}^{-1}] = KW(\nu - 1)/E_f,$$

где $K = 6,24 \cdot 10^{12}$ — коэффициент пропорциональности; ν и E_f [МэВ] — число нейтронов и энергия на акт деления соответственно. Без учета поглощения в активной зоне плотность потока нейтронов Φ_{rc} на поверхности активной зоны, представленной в виде эквивалентной сферы радиусом r , рассчитывается так: $\Phi_{\text{rc}} [\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}] = \varphi [\text{с}^{-1}]/(4\pi r^2)$. Плотность потока тепловых нейтронов $\Phi_{2\pi}$ (2π -эквивалентная) на внешней поверхности замедлителя, окружающего активную зону, пропорциональна плотности потока быстрых нейтронов на поверхности активной зоны: $\Phi_{2\pi} \approx K_{\text{fast}} \Phi_{\text{rc}}$. Таким образом, повысить плотность потока тепловых нейтронов на поверхности замедлителя без изменения мощности можно за счет уменьшения размеров

активной зоны:

$$\Phi_{2\pi} \approx K_{\text{fast}} \varphi [c^{-1}]/(4\pi r^2).$$

С другой стороны, 2π -эквивалентная плотность потока нейтронов на поверхности плоского замедлителя $\Phi_{2\pi}$ определяется следующей формулой:

$$\Phi_{2\pi} = 2\pi f(\Omega) \frac{L^2}{S} \Phi_{\text{sample}}, \quad (1)$$

где S есть площадь поперечного сечения нейтронного пучка, «видимая» образцом, расположенным на расстоянии L от центра S ; $f(\Omega)$ есть векторный поток на единицу телесного угла в направлении пучка нейтронов под углом Ω (Ω — единичный вектор). Оба потока, $f(\Omega)$ и $\Phi_{2\pi}$, усреднены по площади S . Отношение S/L^2 определяет телесный угол, при котором точечный образец (детектор) может «видеть» доступную часть поверхности замедлителя в направлении Ω . Формула (1) есть основа для расчетов по методу Монте-Карло (ММК). С введением в эту формулу различных поправок ее можно использовать также для аналитической оценки плотности потока нейтронов на образце. В формулу (1) можно ввести коэффициент неравномерности нейтронного потока по поверхности замедлителя K_s , для холодных нейтронов — еще и поправку на ослабление пучка нейтронов за счет рассеяния и поглощения на воздухе K_c . Поправка K_c может быть велика, поскольку расстояние от замедлителя до начала зеркального нейтронотода, как это видно из рис. 2, значительное (в метрах). Коэффициент неравномерности потока нейтронов также велик: например, для гребенчатых замедлителей он может составлять по расчетам $K_s = 1,42$. Кроме того, в формуле (1) нужно учесть также тип замедлителя: плоский, гребенчатый, холодный. Это можно сделать через фактор усиления выхода нейтронов K_m из конкретного замедлителя относительно плоского. Например, для гребенчатого водяного замедлителя $K_m = 1,7-2,0$, тогда

$$\Phi_{\text{sample}}(L) = \frac{S\Phi_{2\pi}}{2\pi L^2} K_s K_c K_m. \quad (2)$$

Далее, поток тепловых нейтронов на поверхности замедлителя $\Phi_{2\pi}$, как уже было сказано выше, пропорционален потоку нейтронов на поверхности активной зоны Φ_{rc} : $\Phi_{2\pi} \approx K_{\text{fast}} \Phi_{\text{rc}}$, где K_{fast} есть коэффициент пропорциональности; он определяется геометрией «активная зона — замедлитель». Значение K_{fast} может меняться от $\sim 0,1$ до $0,3$. Таким образом, плотность потока нейтронов на образце как функцию расстояния до образца можно записать в следующем виде:

$$\Phi_{\text{sample}}(L) = \frac{S\Phi_{\text{cr}}}{2\pi L^2} K_{\text{fast}} K_s K_c K_m. \quad (3)$$

Как видно из (3), повысить плотность потока нейтронов на образце при сохранении мощности реактора можно различными путями, но основные из

них два. Первый — это повышение плотности потока нейтронов на поверхности активной зоны $\Phi_{ГС}$ (например, путем уменьшения объема активной зоны с одновременным уменьшением площади утечки нейтронов). Фактически этот путь, так или иначе, сводится к повышению удельной мощности реактора, что имеет технологические ограничения. Кроме того, для ИБР-2М повышение удельной мощности имеет еще и дополнительные ограничения по уровню реакторных шумов и колебательной динамической неустойчивости. В данной работе указанные ограничения не рассматриваются, поскольку требуют отдельных исследований. Второй путь — более эффективное использование полученных тепловых или холодных нейтронов.

Первый путь оптимизации — уменьшение объема активной зоны и площади утечки нейтронов — можно реализовать несколькими путями:

— повышением удельного содержания делящегося материала в топливе (выбор топлива);

— повышением удельного содержания топлива в активной зоне;

— переходом от реактора на быстрых нейтронах к реактору на промежуточных (резонансных) нейтронах;

— изменением геометрии активной зоны на выделенных направлениях утечки нейтронов.

Второй путь оптимизации — более эффективное использование полученных тепловых или холодных нейтронов на достаточно удаленном от активной зоны образце. Этот вопрос связан с оптимизацией замедлителей и более эффективным использованием зеркальных нейтронородов.

Оптимизация нейтронно-физических характеристик ИБР-2М выполнялась расчетным путем с помощью ММК по программе, подобной MCNP-5. В качестве исходной (базовой) модели использовалась модель ИБР-2М. Расчеты по базовой модели ИБР-2М были необходимы, во-первых, для тестовой проверки данных путем сравнения результатов расчета и эксперимента, во-вторых, для оценки необходимой точности расчетов и, в-третьих, как основа при варьировании различных вариантов активной зоны, типов топлива и модуляторов реактивности.

2. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ОПТИМИЗАЦИИ ИБР-2М

Ниже рассматриваются основные направления возможного повышения плотности потока нейтронов в пучках при сохранении средней мощности реактора.

2.1. Выбор топлива. Вид топлива существенно влияет на критическую загрузку активной зоны. Обычно в качестве топлива в быстрых реакторах

используются соединения ^{235}U или ^{239}Pu . Наиболее характерные композиции: металлический ^{239}Pu и ^{235}U и их сплавы, а также диоксиды PuO_2 , UO_2 и нитриды PuN , UN . Нитриды имеют более высокую по сравнению с оксидами плотность и в настоящее время рассматриваются как перспективное топливо для быстрых реакторов. Рассматривается также делящийся материал на основе металлического ^{237}Np и его оксида NpO_2 . Неуптуний используется в подкритических активных зонах, например, в импульсных каскадных бустерах, управляемых ускорителем [6–8]. Для сравнения возможностей использования разных видов топлива в нейтронных источниках, ориентированных на пучковые эксперименты, можно взять, например, следующий критерий: плотность потока нейтронов на поверхности критической сферы. На рис. 3 показаны размеры критических сфер для указанных выше делящихся материалов. На рис. 4 для сравнения приведены размеры критических сфер с однородным распределением топлива в виде диоксида нептуния (NpO_2) и плутония (PuO_2) с реальным составом конструкционных материалов, содержащихся в активной зоне ИБР-2М. В табл. 1 представлены некоторые параметры критических сфер, в том числе плотность потока нейтронов на их поверхности при мощности 2 МВт, а также мощность критических сфер, при которой плотность потока нейтронов на их поверхности равна плотности потока на сфере из PuO_2 при мощности 2 МВт. Фактически это показывает, какую нужно иметь мощность реактора ИБР-2М при замене топлива на другой тип с сохранением плотности потока нейтронов. Такие оценки качества

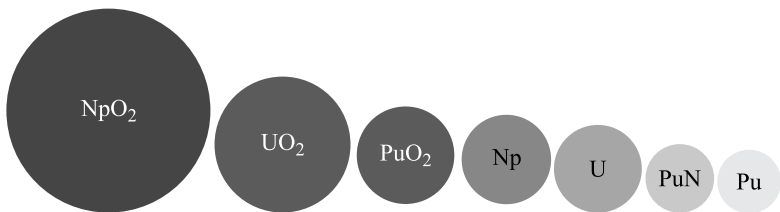


Рис. 3. Относительные размеры критических сфер для некоторых делящихся материалов. Параметры критических сфер приведены в табл. 1

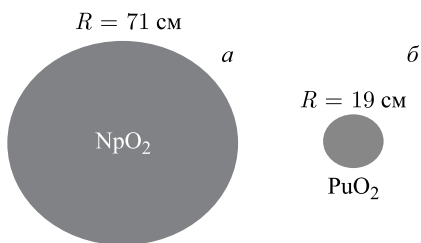


Рис. 4. Размеры критических сфер с однородным распределением топлива из двуоксида нептуния (NpO_2) (а) и плутония (PuO_2) (б) с изотопным составом конструкционных материалов, находящихся в активной зоне ИБР-2М с натриевым теплоносителем. Указан радиус критических сфер

Таблица 1. Некоторые характеристики критических сфер из соединений ^{235}U , ^{239}Pu и ^{237}Np : плотность ρ , радиус $R_{\text{кр}}$, объем V , масса M , площадь поверхности S , плотность потока нейтронов на поверхности при мощности 2 МВт Φ и мощность сферы W при плотности потока нейтронов, равной плотности потока на сфере из PuO_2 (аналоге активной зоны ИБР-2М)

Вид топлива	ρ , г/см ³	$R_{\text{кр}}$, см	V , см ³	M , кг	S , см ²	Φ , 10^{13} см ⁻² · с ⁻¹	W , МВт
Pu	15,61	6,385	1,090E3	17,0	512,3	39,3	0,88
PuO ₂	10,11	9,60	3,706E3	37,5	1158,1	17,5	2,00
PuN	14,30	6,915	1,385E3	19,8	601,0	32,7	1,07
^{235}U	18,74	8,75	2,806E3	52,5	962,1	15,9	2,19
UO ₂	10,95	13,5	1,030E4	112,8	2290,2	6,65	5,26
^{237}Np	20,50	8,84	2,893E3	59,3	982,0	16,2	2,15
NpO ₂	10,20	20,0	3,351E4	341,8	5026,5	2,68	13,00
PuO ₂ (гомоген)	6,075	19,15	2,942E4	178,7	4608,4	4,40	3,96 (2)
NpO ₂ (гомоген)	6,042	71,0	1,499E6	9057,0	63347,1	0,098	178,6 (90)

Примечание. В скобках для сравнения приведена мощность сфер с PuO₂ и NpO₂ при гомогенном распределении топлива и конструкционных материалов при плотности потока нейтронов на поверхности сфер, равной плотности потока на сфере из PuO₂.

топлива приближенные, но дают вполне наглядное представление о применимости того или иного вида топлива для пучковых источников нейтронов. Как видно из рис. 3, 4 и табл. 1, самым хорошим топливом для высокопоточных источников нейтронов являются соединения плутония, самым плохим — соединения нептуния. В чистом виде нептуний в качестве топлива не используется, а его соединения или сплавы резко увеличивают критические размеры активной зоны. Пороговый характер сечения деления нептуния приводит к тому, что в реальном спектре активной зоны более половины нейтронов находятся в подпороговой области энергии и выбывают из процесса деления. Иллюстрация этому приведена на рис. 5, на котором для сравнения показаны спектры нейтронов в активной зоне из двуокиси плутония и двуокиси нептуния. Серым цветом отмечена подпороговая область спектра нейтронов.

Таким образом, как следует из табл. 1, наилучшим топливом для пучковых источников нейтронов остается плутоний в виде металлического сплава или нитрида плутония. Весь объем накопленных знаний по исследованию

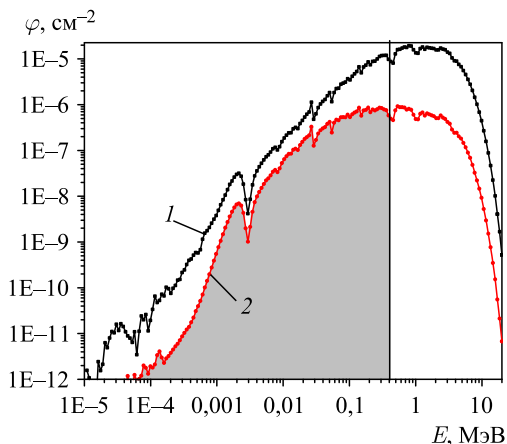


Рис. 5. Энергетическое распределение потока нейтронов в критическом реакторе с топливом из двуокиси плутония (PuO_2) (1) и нептуния (NpO_2) (2). Серым цветом отмечена подпороговая область деления с энергией менее 0,4 МэВ в реакторе с двуокисью нептуния

твэлов с нитридным топливом на реакторах БР-10, БОР-60 показывает, что надежность твэлов с нитридным топливом в начальный период эксплуатации может быть достаточно высокой [9–11]. Порог работоспособности твэлов с нитридным топливом по выгоранию оценивают сегодня в 5 % т.а., в далекой перспективе — в 10 % т.а. Для оксидного топлива соответственно в 10 % т.а., в далекой перспективе — в 20 % т.а. [10]. Нептуний в любом соединении или сплаве существенно уступает по выходу нейтронов плутонию и урану. Например, мощность сферы из двуокиси нептуния, при которой плотность потока нейтронов на ее поверхности равна плотности потока на поверхности такой же сферы из двуокиси плутония при мощности 2 МВт (аналог ИБР-2М), составляет 13 МВт. Мощность же сферы из двуокиси нептуния с реальным ее наполнением конструкционными материалами равна уже 90 МВт.

2.2. Повышение объемной доли топлива в активной зоне. Повышение объемной доли топлива в активной зоне рассматривается в концепции плотной упаковки тепловыделяющей сборки (ТВС). Плотная упаковка топлива предполагает уменьшение доли конструкционных материалов и уменьшение критических размеров активной зоны. С другой стороны, уход от плотной упаковки к менее плотной позволяет улучшить условия теплосъема и повысить энергонапряженность активной зоны. Таким образом, при изменении объемной доли топлива необходима оптимизация активной зоны по коэффициенту размножения и теплосъему.

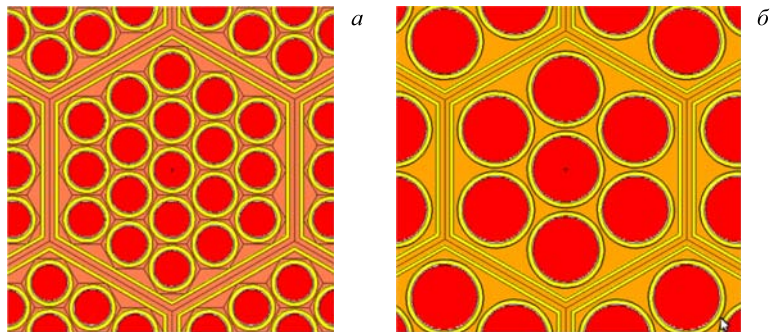


Рис. 6. Упаковка топлива в 19-твэльной конструкции ТВС ИБР-2М (а) и в стандартной 7-твэльной (б)

Стандартная упаковка ТВС в ИБР-2М состоит из 7 твэлов. Возможна упаковка, состоящая из 19 твэлов. На рис.6 показан вариант упаковки ТВС ИБР-2М с 19 и 7 твэлами. Диаметр твэлов в 19-твэльной конструкции ТВС равен 5 мм, диаметр по топливу — 4 мм. Шаг твэльной решетки равен 5,52 мм. Очевидные различия двух вариантов ТВС следующие: 19-твэльная конструкция уменьшает объемную долю топлива в активной зоне на 26 % и в то же время повышает поверхность теплообмена на 57 %. Улучшение теплосъема позволяет увеличить удельную мощность, но для сохранения объема активной зоны из-за потери эффективности необходимо использовать топливо с более высокой удельной плотностью, например нитрид плутония.

Для сравнения рассмотрим также конструкцию ТВС с размещенным в ней только одним твэлом. Действительно, объемная доля топлива в этом случае увеличивается в полтора раза, но поверхность теплосъема уменьшается до $\sim 40\%$ от поверхности 7-твэльной конструкции ТВС. Использование такой конструкции неприемлемо, поскольку уменьшение объема активной зоны вследствие увеличения эффективности топлива приведет к значительному возрастанию удельной мощности при существенном ухудшении теплосъема.

Расчеты, проведенные для базовой конструкции ИБР-2М с натриевым теплоносителем, показали, что эффективность активной зоны при стандартной упаковке ТВС ИБР-2М на $\sim 12\%$ выше, чем при 19-твэльной конструкции. Это еще раз подтверждает оптимальный выбор штатной конструкции ТВС ИБР-2М по ее основным параметрам.

2.3. Переход от реактора ИБР-2М на быстрых нейтронах к реактору на промежуточных (резонансных) нейтронах путем замены натриевого теплоносителя на воду. Расчеты показали, что доля нейтронов, вызывающих деление в промежуточной и быстрой областях энергии, при замене натрие-

вого теплоносителя на воду составляет 47 и 45 % соответственно, т. е. наблюдается значительный сдвиг энергии нейтронов из быстрой области в резонансную. Отсюда ИБР-2М с водяным охлаждением можно отнести к реактору на промежуточных (резонансных) нейтронах. Изменение плотности упаковки топлива в варианте рис. 6 меняет указанные выше цифры не более чем на 5 %. В целом перевод реактора ИБР-2М на деления в резонансной области энергии нейтронов, т. е. в область с более высоким сечением деления, позволяет уменьшить число ТВС, но с негативным эффектом возрастания времени жизни мгновенных нейтронов. Плотность потока тепловых нейтронов на поверхности гребенчатого замедлителя в таком реакторе не превышает $\Phi_{th} \approx 3,0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

2.4. Оптимизация гребенчатого замедлителя тепловых нейтронов ИБР-2М путем окружения его бериллиевым отражателем. Рассматривается компоновка активной зоны ИБР-2М с топливом из двуокиси плутония и натриевым теплоносителем, водяной гребенчатый замедлитель со стороны 4-го, 5-го и 6-го пучков окружен бериллиевым отражателем. Расчетная модель активной зоны в области замедлителя приведена на рис. 7.

Результат оптимизации гребенчатого замедлителя довольно значительный: плотность потока нейтронов в указанных пучках повысилась в 1,45 раза и составила $7,0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Ниже представлены основные расчетные результаты оптимизации ИБР-2М, основанные на использовании изложенных выше способов повышения плотности потока нейтронов в пучках.

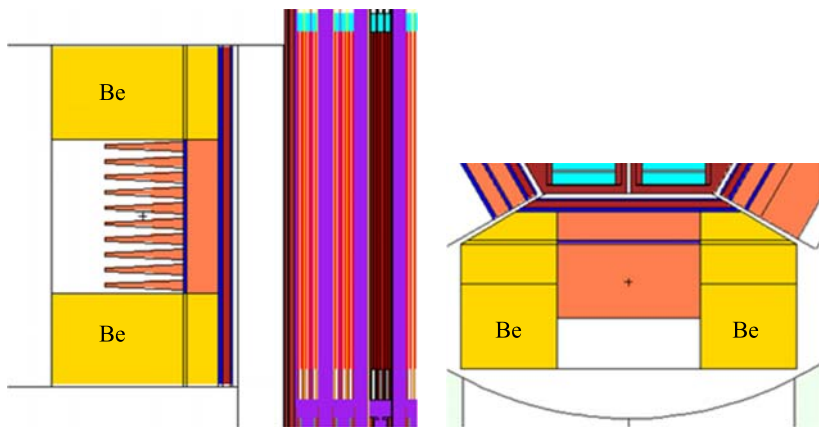


Рис. 7. Расчетная модель активной зоны быстрого реактора в базовой компоновке ИБР-2М с топливом из двуокиси плутония и натриевым теплоносителем. Водяной гребенчатый замедлитель окружен отражателем из бериллия

3. РЕАКТОР ИБР-2М КАК ПРИМЕР ОПТИМИЗАЦИИ ИБР-2

Основная идея модернизации ИБР-2, реализованная в реакторе ИБР-2М в конце 2011 г., состояла в повышении надежности и безопасности установки. Предполагалось также несколько увеличить плотность потока нейтронов на поверхности активной зоны за счет уменьшения ее объема. Схематически поперечное сечение ИБР-2М и ИБР-2 для сравнения показано на рис. 8, а в табл. 2 приведены некоторые параметры реакторов. В табл. 3 представлены коэффициенты усиления (K_y) плотности потока нейтронов на поверхности водяных замедлителей ИБР-2М со стороны всех 14 нейтронных пучков по отношению к ИБР-2. Как видно из табл. 2 и 3, существенного повышения плотности потока нейтронов в пучках модернизированного реактора не получилось. Уменьшение критической загрузки активной зоны (см. табл. 2) при-

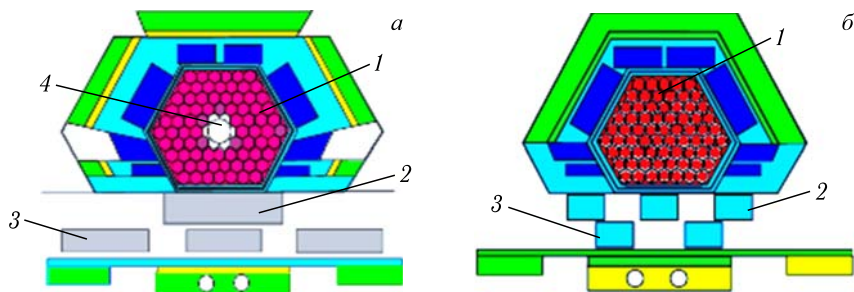


Рис. 8. Поперечное сечение активной зоны ИБР-2 (а) и ИБР-2М (б): 1 — активная зона; 2 — основной подвижный отражатель; 3 — дополнительный подвижный отражатель; 4 — канал мишени ускорителя

Таблица 2. Параметры ИБР-2 и ИБР-2М при номинальной средней мощности 2 МВт и частоте повторения всплеск 5 1/с

Параметр	ИБР-2	ИБР-2М
Тип топлива	PuO ₂	PuO ₂
Количество ТВС	78	69
Объем активной зоны, л	22	18
Максимальное выгорание, %	6,5	9
Мощность в импульсе, МВт	1500	1830
Полуширина импульса, мкс	245	200
Теплоноситель	Натрий	Натрий
Средняя плотность потока тепловых нейтронов на поверхности гребенчатого замедлителя (интервал от 0 до 0,65 эВ), см ⁻² · с ⁻¹	< 5 · 10 ¹²	5 · 10 ¹²

Таблица 3. Коэффициент усиления (K_y) плотности потока нейтронов на поверхности водяных замедлителей в направлении нейтронных пучков ИБР-2М по отношению к ИБР-2

№ пучка	K_y	№ пучка	K_y	№ пучка	K_y
1	0,57	6	0,92	11	0,39
2	1,47	7	1,79	12	1,02
3	1,46	8	1,72	13	1,07
4	0,92	9	0,65	14	1,07
5	0,92	10	1,48		

вело к тому, что в отдельных нейтронных пучках плотность потока нейтронов действительно повысилась на $\sim 50\%$, но в основных, 4-м, 5-м и 6-м, — понизилась на 8%. В некоторых пучках понижение составило $\sim 50\%$ и более. Такое перераспределение плотности потока нейтронов вызвано повышением асимметрии активной зоны относительно ИБР-2.

4. ОПТИМИЗАЦИЯ РЕАКТОРА ИБР-2М ПО НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

В разделе представлены расчетные данные для некоторых вариантов компоновки активной зоны реактора, направленные на увеличение плотности потока тепловых нейтронов в пучках Φ_{th} . Для удобства сравнения все варианты рассматриваются с плоскими водяными замедлителями толщиной 5 см,

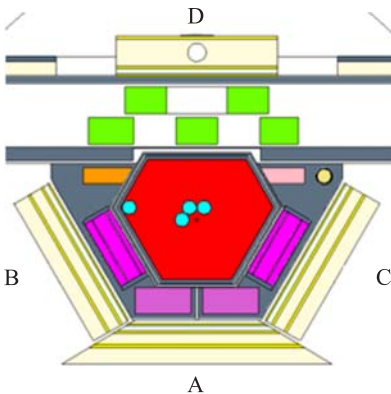


Рис. 9. Поперечное сечение расчетной геометрии активной зоны ИБР-2М с плоскими водяными замедлителями при загрузке 65 ТВС

и во всех вариантах для этой же цели выделены основные направления выхода тепловых нейтронов, обозначенные буквами А, В, С, D. Плотность потока нейтронов Φ_{th} представлена как средний поток тепловых нейтронов в интервале от ~ 0 до 0,6 эВ на поверхности пятна площадью 5×5 см в центре водяного замедлителя.

Вариант 1. Базовая модель ИБР-2М с плоскими водяными замедлителями. Реактор ИБР-2М с плоскими водяными замедлителями рассматривается как базовая расчетная модель с числом ТВС, равным 65 (см. рис. 9). Расчетная плотность потока нейтронов Φ_{th} в направлениях А, В, С и D приведена в табл. 4.

Таблица 4. Плотность потока тепловых нейтронов Φ_{th} в направлениях А, В, С, D активной зоны ИБР-2М с плоскими водяными замедлителями

Направление	$\Phi_{th}, 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Номер пучка
А	3,78	4, 5, 6
В	3,47	2, 3
С	3,40	7, 8, 10, 11
Д	2,01	12, 13, 14

Вариант 2. ИБР-2М с водяным охлаждением при разной упаковке активной зоны. Реактор ИБР-2М на промежуточных (резонансных) нейтронах. Конструкция ИБР-2М переделана на водяное охлаждение активной зоны с PuO_2 (рис. 10). Рассматривается стандартная 7-твэльная и 19-твэльная упаковки. Вариант с водяным охлаждением активной зоны дает выигрыш в критической массе топлива, но значительно увеличивает время жизни мгновенных нейтронов примерно в 10 раз ($\sim 600 \text{ нс}$). Соответственно, в 2,3 раза возрастает и длительность импульса быстрых нейтронов — до 430 вместо 200 мкс. При этом асимметрия выхода нейтронов по сравнению с ИБР-2М усиливается. Так, в направлении пучков 4, 5, 6 плотность потока Φ_{th} возрастает в 2,4 раза, а для пучков 2 и 8 снижается в ~ 2 раза (см. табл. 5). Кроме того, во избежание перегрева оболочек твэлов активная зона должна находиться под избыточным давлением — как минимум, около 0,3 МПа. Это приводит к уменьшению глубины модуляции реактивно-

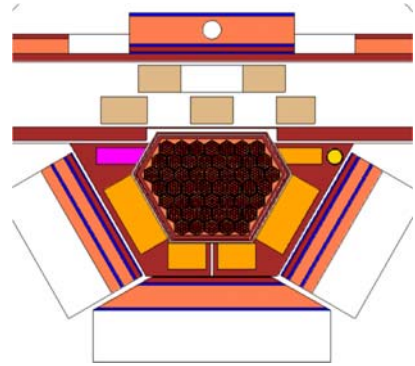


Рис. 10. Поперечное сечение расчетной геометрии активной зоны ИБР-2М с водяным охлаждением и плоскими водяными замедлителями. Реактор на промежуточных (резонансных) нейтронах

Таблица 5. Фактор выигрыша в плотности потока нейтронов в реакторе с водяным охлаждением относительно реактора ИБР-2М для некоторых нейтронных пучков при разной упаковке ТВС (7 и 19 твэлов)

Номер пучка	19-твэльная упаковка	7-твэльная упаковка
1	0,26	0,25
2	0,58	0,56
5	2,77	2,40
8	0,61	0,52

сти ΔK_{MR} из-за увеличения толщин стенок корпуса активной зоны и повышению уровня фона.

Изменение упаковки топлива в ТВС с 7- на 19-твэльную, как видно из табл. 5, практически не влияет на плотность потока тепловых нейтронов. Поэтому использование 19-твэльной упаковки может быть оправдано только необходимостью повышения удельного энерговыделения или просто снижения температуры оболочек твэлов, поскольку в 19-твэльной упаковке существенно улучшаются условия теплосъема.

Кроме того, эффективность активной зоны с водяным охлаждением независимо от числа твэлов (19 или 7) выше по сравнению с натриевым на 10–12 % $K_{эф}$. Это позволяет сократить число ТВС с 69 до 50.

Нужно также отметить, что реактор ИБР-2М с водяным охлаждением можно отнести к реакторам с так называемым «смешанным» спектром нейтронов в активной зоне. Это свойство реактора существенно повышает его ядерную безопасность. Действительно, в аварийной ситуации с потерей теплоносителя спектр нейтронов в активной зоне становится более жестким, сечение деления уменьшается и мощность, соответственно, падает. Таким образом, главная проектная авария с потерей теплоносителя будет сопровождаться отрицательным вводом реактивности.

В целом реактор ИБР-2М с водяным охлаждением не дает выигрыша в плотности потока тепловых нейтронов по отношению к штатной схеме активной зоны ИБР-2М с натриевым теплоносителем.

Вариант 3. ИБР-2М с компактной активной зоной с топливом из нитрида плутония (PuN). Реактор с топливом из нитрида плутония имеет, как было указано в разд. 2, наиболее компактную активную зону по сравнению с другими видами топлива. Грань активной зоны в месте примыкания модулятора реактивности оставлена без изменений по количеству ТВС, как в ИБР-2М (см. рис. 8). Получается компактная активная зона объемом ~ 6 л вместо 20 л (33 ТВС типа ИБР-2М вместо 69). Высота активной зоны уменьшена до 30 см (в ИБР-2М 44 см). С учетом допустимой температуры для PuN не более 1500 °С и импульсного подогрева твэлов не более 50 °С в конструкции компактной зоны можно реализовать среднюю мощность, равную 2 МВт. Модулятор реактивности — штатный. Водяной плоский замедлитель установлен по центру активной зоны, а сверху и снизу окружен бериллиевыми блоками оптимальной толщины. Расчетная модель реактора показана на рис. 11.

При указанной выше компоновке активной зоны и мощности 2 МВт значение плотности потока тепловых нейтронов Φ_{th} в направлении максимального выхода нейтронов (А на рис. 11) по сравнению с ИБР-2М увеличивается, но незначительно — всего в 1,4 раза: $\Phi_{th} = 6,9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. При установке гребенчатого замедлителя $\Phi_{th} = 1,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Здесь необходимо отметить следующий положительный факт: время жизни ней-

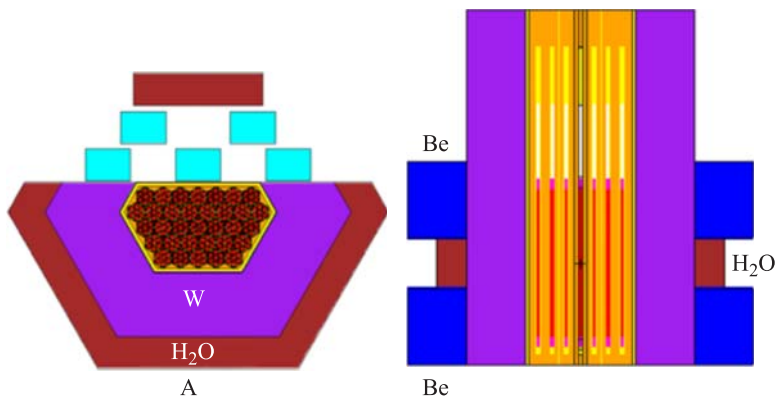


Рис. 11. Расчетная модель активной зоны ИБР-2М с компактной активной зоной из нитрида плутония (PuN)

тронов по сравнению с ИБР-2М уменьшается до $\tau = 35$ нс, что позволяет сократить длительность вспышки до 160 мкс. Эффективный коэффициент размножения при полной загрузке активной зоны не превышает 1,03.

Существенным достоинством такой схемы активной зоны является высокая эффективность блоков регулирования и защиты (вольфрамовый слой на рис.11). Суммарный эффект блоков системы управления и защиты (СУЗ) из сплава ВНЖ-90 плотностью 15 г/см^3 составляет $\sim 11\% K_{\text{эф}}$, что в два раза больше необходимого для организации безопасной работы реактора.

Вариант 4. ИБР-2М с компактной активной зоной и водяным замедлителем, расположенным вплотную к активной зоне. Характерной особенностью указанной компоновки активной зоны является приближение водяного замедлителя вплотную к активной зоне без экранировки его стационарным отражателем (рис.12). Этим можно достичь максимально возможной плотности потока тепловых нейтронов на поверхности замедлителя.

Для сокращения длительности вспышки предусмотрена защита активной зоны в виде прослойки из гадолиния от натекания тепловых нейтронов. Несмотря на это, приближение замедлителя вплотную к активной зоне без экранировки его стационарным отражателем является причиной роста времени жизни нейтронов с $\tau = 65$ нс (ИБР-2М) до $\tau = 140$ нс и соответствующего роста длительности импульса быстрых нейтронов до 300 мкс. Поскольку эффект реактивности, обусловленный сливом воды, при такой конструкции активной зоны по расчетам отрицательный и довольно большой ($\sim 2\% K_{\text{эф}}$), рост времени жизни нейтронов в активной зоне реализуется, по-видимому, за счет обратного рассеяния значительной доли резонансных

нейтронов. Если экранировать активную зону не только от тепловых, но и от резонансных нейтронов, например, путем установки между активной зоной и замедлителем прослойки из карбида бора, то эффект реактивности, обусловленный сливом воды, поменял бы знак, т. е. был бы положительным и «плохим» с точки зрения ядерной безопасности. Поэтому длительность импульса нейтронов при тесной связи «активная зона–замедлитель» теоретически можно сократить, но только за счет снижения уровня безопасности и частично за счет уменьшения плотности потока нейтронов, поскольку увеличивается расстояние от активной зоны до поверхности замедлителя.

Кроме того, при плотной связи «активная зона–замедлитель», как видно из рис. 12–14, в конструкции активной зоны не предусматривается какая-либо эффективная аварийная защита и управление, что недопустимо. Единственный эффективный способ ввести аварийную защиту — заменить нижний блок замедлителя из бериллия на вольфрамовые блоки. Но даже в этом случае эффективность блоков СУЗ не превысит 3,5%. Для реактора типа ИБР-2 этого явно недостаточно, так как защитные функции и управление мощностью должны обеспечиваться с эффективностью не менее 5%. Это требование основывается на физических принципах работы реактора. Кроме того, должен быть обеспечен еще и достаточный запас реактивности на выгорание топлива. Эффективность защиты реактора можно увеличить, но только за счет существенной потери в плотности потока тепловых нейтронов. Оценки показывают, что оптимальное состояние между эффективностью аварийной защиты и плотностью потока тепловых нейтронов на поверхности замедлителя будет у конструкции, близкой к обычной конструкции активной зоны ИБР-2М, или у конструкции, близкой к представленной на рис. 11. Поэтому компактная зона с расположенным вплотную к ней водяным замедлителем рассматривается здесь только с точки зрения теоретического анализа возможности повышения плотности потока нейтронов в пучках. Реализация такого источника в настоящее время потребует решения множества технических проблем. Это относится ко всем вариантам реактора с тесной связью «активная зона–замедлитель», рассмотренным ниже.

Вариант 4.1. ИБР-2М с компактной активной зоной и штатным модулятором реактивности. Модулятор реактивности — штатный. Геометрия расчетной модели приведена на рис. 12. При указанной компоновке реактора получают максимальные предельные значения плотности потока тепловых нейтронов на поверхности замедлителя. Значения Φ_{th} приведены в табл. 6. При постановке гребенчатого замедлителя $\Phi_{th}^{max} = 4,25 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Уровень фона составляет 5,7%, что в 1,4 раза меньше, чем в ИБР-2М. Длительность импульса быстрых нейтронов — 300 мкс, тепловых — 500 мкс.

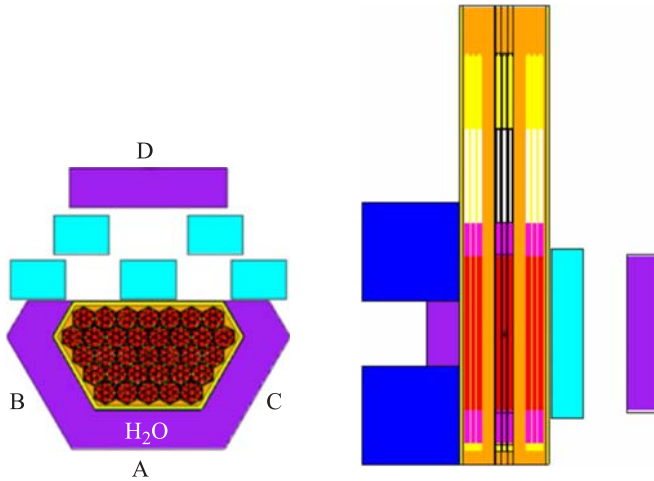


Рис. 12. Расчетная модель ИБР-2М с компактной активной зоной с топливом из PuN и замедлителем, расположенным вплотную к активной зоне

Таблица 6. Плотность потока тепловых нейтронов и фактор выигрыша $\Phi_{th}/\Phi_{th}^{ИБР-2М}$ в реакторе с топливом из нитрида плутония (PuN) относительно ИБР-2М. Водяные замедлители вплотную придвинуты к активной зоне

Направление	$\Phi_{th}, 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$\Phi_{th}/\Phi_{th}^{ИБР-2М}$
A	2,5	5,0
D	0,26	1,3

Вариант 4.2. ИБР-2М с компактной активной зоной из нитрида плутония (PuN) и никелевым подвижным отражателем в виде одного блока. Активная зона, как и в варианте 4.1, с топливом из PuN, но вместо штатного модулятора реактивности ИБР-2М вращается никелевый блок со следующими размерами: ширина — 20 см, высота — 24 см, толщина — 10 см (см. рис. 13). Этот вариант привлекателен тем, что значительно упрощается конструкция модулятора реактивности, повышается его надежность и безопасность. Кроме того, при такой конструкции модулятора реактивности имеем режим без побочных импульсов. Плотность потока тепловых нейтронов приведена в табл. 7.

Из условий допустимой температуры топлива и импульсного подогрева средняя мощность в активной зоне возможна на уровне не выше 3 МВт и плотность потока тепловых нейтронов — не выше $\Phi_{th} = 4,4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (плоский замедлитель). Фон между импульсами $W_{\Phi}/\overline{W} = 4,3\%$ — в 1,8 раза

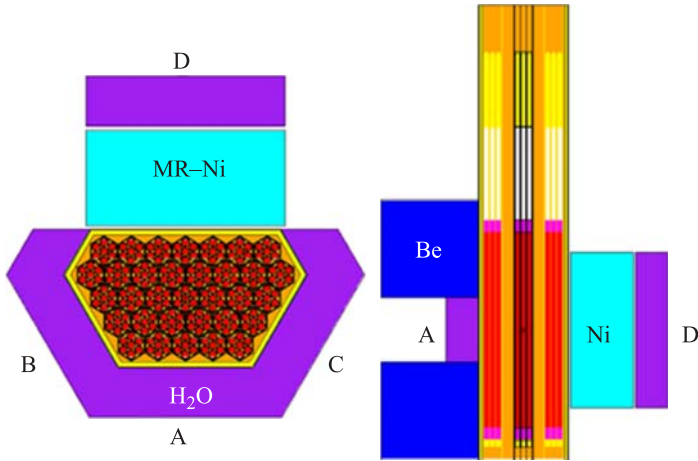


Рис. 13. Поперечное сечение расчетной геометрии ИБР-2М с компактной зоной с топливом в виде нитрида плутония (PuN) и никелевым подвижным отражателем в виде одного блока. MR — модулятор реактивности

Таблица 7. Плотность потока тепловых нейтронов и фактор выигрыша $\Phi_{th}/\Phi_{th}^{ИБР-2М}$ в реакторе с топливом из нитрида плутония (PuN) и никелевым подвижным отражателем относительно ИБР-2М

Направление	$\Phi_{th}, 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$\Phi_{th}/\Phi_{th}^{ИБР-2М}$
A	2,93	7,75
B	1,96	5,65
C	1,96	5,65
D	0,22	1,1

меньше, чем в ИБР-2М. Негативным фактором рассматриваемого варианта является большая длительность импульса быстрых нейтронов: $\Theta_{1/2} = 500$ мкс.

Вариант 4.3. Компактная активная зона с топливом из нитрида плутония (PuN) с вертикальной осью вращения модулятора реактивности. С целью упрощения конструкции модулятора реактивности и повышения выхода нейтронов для пучков 12, 13, 14 исследована компактная активная зона высотой 24 см с топливом из PuN и вертикальной осью вращения модулятора реактивности (рис. 14). Получен достаточно высокий поток нейтронов в направлении А: $\Phi_{th} = 2,4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Однако длительность импульса быстрых нейтронов существенно возрастает до ~ 700 мкс.

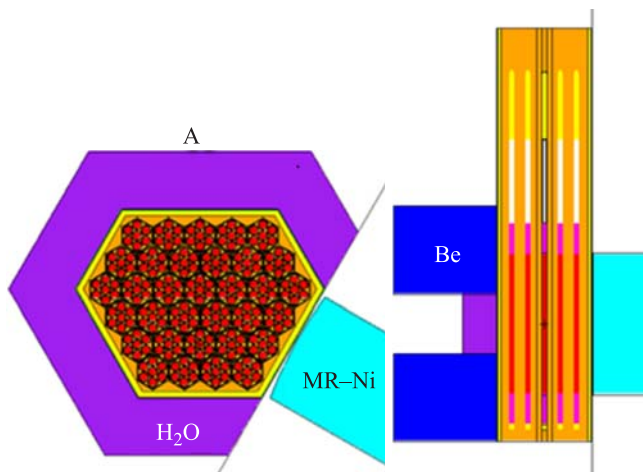


Рис. 14. Поперечное сечение расчетной геометрии активной зоны ИБР-2М с топливом в виде нитрида плутония (PuN) и никелевым подвижным отражателем в виде одного блока с вертикальной осью вращения. MR — модулятор реактивности

Сводные данные по оптимизации активной зоны ИБР-2М и их анализ. Основные нейтронно-физические и некоторые термодинамические характеристики различных вариантов оптимизации активной зоны ИБР-2М, анализ которых приведен выше, сведены в табл. 8. В табл. 9 даны некоторые ограничения по работе указанных вариантов реактора и его отдельных узлов. В таблицах обозначены варианты оптимизации ИБР-2М с тесной связью «активная зона–замедлитель» (варианты 4.1–4.3), в которых необходимо решать проблему повышения эффективности аварийной защиты и управления.

Как видно из табл. 8, 9, оптимальным вариантом с точки зрения удельного энерговыделения, теплосъема, продолжительности работы без замены активной зоны или корпуса, параметров импульса остается действующий в настоящее время реактор ИБР-2М. Другие варианты реактора, № 2 и № 3, действительно позволяют получить плотность потока нейтронов в пучках в 2,0–2,5 раза выше, чем в ИБР-2М, но при этом имеют существенные недостатки. Основные из них следующие: большая длительность импульса, проблемы с охлаждением активной зоны и понижение ресурса (вариант № 2) или опять же понижение ресурса, проблемы охлаждения и возможные проблемы при переходе на новое топливо — с PuO_2 на PuN (вариант № 3). Фактически переход на варианты № 2 или № 3 означает отказ от проработанного реактора ИБР-2М и замену его на некий совершенно неисследованный вариант реактора с зыбкой надеждой на повышение плотности потока нейтронов всего в 2,0–2,5 раза. Практика показывает, что расчетный запас плотности

Таблица 8. Результаты нейтронно-физических и тепловых расчетов различных вариантов оптимизации ИБР-2М для средней мощности 2 МВт

Параметр	Номер варианта					
	1	2	3	4.1	4.2	4.3
1. Максимальная плотность потока тепловых нейтронов Φ_{th} на поверхности плоского водяного замедлителя, $10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	0,38	0,91	0,69	2,5	2,93	2,4
2. Частота импульсов, с^{-1}	5	5	5	5	10	10
3. Длительность импульса быстрых нейтронов, мкс	200	420	160	300	500	670
4. Время жизни мгновенных нейтронов, нс	65	600	35	140	127	1368
5. Фон между импульсами W_{Φ}/\overline{W} , %	8,6	8,6	8,6	5,7	4,3	5,5
6. Эффективность модулятора реактивности, %	2,7	2,7	27	3,8	5	3,9
7. Топливо	PuO ₂	PuO ₂	PuN	PuN	PuN	PuN
8. Число ТВС	69	50	33	33	33	33
9. Масса топлива, кг	89	65	43	43	43	34
10. Температура центра твэла, °С	900	570	1000	1000	1000	1160
11. Мощность в импульсе, МВт	1840	870	250	1250	380	280
12. Подогрев за импульс (max), °С	18	18	44	44	22	28
13. Теплоноситель	Na	H ₂ O	Na	Na	Na	Na
14. Отражатель	W	W	Be	Be	Be	Be

Примечание. 4.1–4.3 — варианты оптимизации ИБР-2М с тесной связью «активная зона – замедлитель», в которых необходимо решать проблему повышения эффективности аварийной защиты и управления.

потока в 2–3 раза может теряться при решении различных непредвиденных проблем, возникающих при пуске такой сложной и уникальной установки, как ИБР-2М.

Варианты реактора 4.1–4.3 с плотностью потока тепловых нейтронов более $\sim 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (табл. 8 и 9) рассматриваются чисто теоретически. Во-первых, в этих вариантах получается большая длительность импульса быстрых нейтронов, от 300 до ~ 700 мкс; во-вторых, необходим переход на новое топливо (PuN) с в два раза меньшим ресурсом на выгорание, чем у ИБР-2М, что уже нехорошо; в-третьих, что самое главное, возникает проблема обеспечения необходимой эффективности аварийной защиты и управления.

Таблица 9. Предельные значения некоторых параметров различных вариантов оптимизации ИБР-2М. Средняя мощность 2 МВт

Параметр	Номер варианта					
	1	2	3	4.1	4.2	4.3
1. Максимальная плотность потока тепловых нейтронов Φ_{th} на поверхности гребенчатого водяного замедлителя, $10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	0,64	154	1,17	4,25	4,98	4,08
2. Топливо	PuO ₂	PuO ₂	PuN	PuN	PuN	PuN
3. Масса топлива, кг	89	65	43	43	43	34
4. Удельное энерговыделение в активной зоне, кВт/кг	22,4	30,7	46,5	46,5	46,5	58,8
5. Предельная энерговыработка (МВт · сут) и время работы реактора (год) по выгоранию:						
достигнутый уровень выгорания 9 % т. а. PuO ₂ и 5 % т. а. PuN	5200/ 7,2	3800/ 5,3	1300/ 13,0 мес	1300/ 13,0 мес	1300/ 9,0 мес	1200/ 9,1 мес
ожидаемый в перспективе уровень выгорания 20 % т. а. PuO ₂ и 10 % т. а. PuN	11555/ 14,4	7600/ 10,6	2600/ 2,2	2600/ 2,20	2600/ 1,50	2400/ 1,8
6. Предельная продолжительность непрерывной работы мезитиленового холодного замедлителя, сут	10,0	5,0	5,5	1,5	1,3	1,6

Преимуществом реактора ИБР-2М является использование технологий, отработанных за время многолетней эксплуатации ИБР-2 (натриевое охлаждение, перегрузка топлива, подвижный отражатель), и, как следствие, относительно низкая стоимость установки.

5. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА РЕАКТОРЕ ТИПА ИБР-2М ХОЛОДНОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ НЕЙТРОНОВ

Плотность потока нейтронов нужной энергии на образце, как это видно из (2), существенно зависит не только от плотности потока нейтронов на поверхности активной зоны, но и от вида замедлителя и потерь нейтронов при их транспортировке от замедлителя до образца. Конструкция ИБР-2М позволяет установить достаточно эффективные замедлители (водяные гребенчатые, криогенные).

Опыт эксплуатации ИБР-2 показал, что установка гребенчатых водяных замедлителей вместо плоских повышает выход тепловых нейтронов в зависимости от расположения замедлителя относительно активной зоны в среднем в 1,7–2,0 раза.

Если говорить об эффективности использования на реакторе ИБР-2М холодного замедлителя, то здесь ситуация следующая. Ранее расчетным и экспериментальным путем было показано, что усиление выхода нейтронов на пучках 4, 5 и 6 ИБР-2 за счет установки холодного метанового замедлителя дает хорошие результаты. Выигрыш в плотности потока холодных нейтронов с поверхности метанового замедлителя относительно гребенчатого водяного в диапазоне длин волн от 5 до 9 Å составил приблизительно 10–12 раз [12]. Тогда же были проведены исследования зависимости выхода нейтронов от температуры замедлителя. Однако из-за неустойчивой работы твердого метанового замедлителя в полях реакторного излучения от этого замедлителя отказались.

Более перспективным был признан мезитиленовый холодный замедлитель, хотя его радиационная стойкость оставляет желать лучшего [13]. Расчетный вариант холодного замедлителя с мезитиленом при установке его на пучках 4, 5 и 6 представлен на рис. 15. Расчеты проводились для холодного замедлителя с водяным плоским предзамедлителем толщиной 4 см. Из рис. 16 видно, что мезитиленовый замедлитель при температуре 23 К позволяет повысить плотность потока нейтронов на его поверхности в диапазоне длин волн от 5 до 9 Å приблизительно в 6–7 раз, что меньше метанового в 1,6 раза. Кроме того, низкая радиационная стойкость мезитиленового замедлителя в полях реакторного облучения ИБР-2М ($\sim 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) не позволяет использовать его в работе более 10 сут [13]. Это ограничивает возможности применения мезитилена, как и других органических холодных замедлителей, в более интенсивных, чем ИБР-2М, источниках нейтронов.

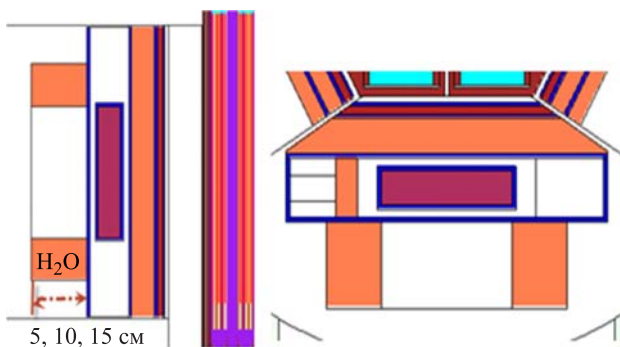


Рис. 15. Расчетная модель холодного замедлителя

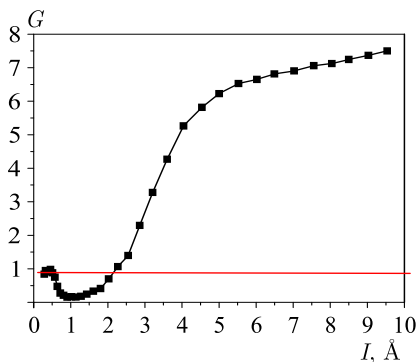


Рис. 16. Фактор выигрыша холодных нейтронов мезитилена при 23 К (G) относительно штатного гребенчатого водяного замедлителя ИБР-2М в зависимости от длины волны нейтронов

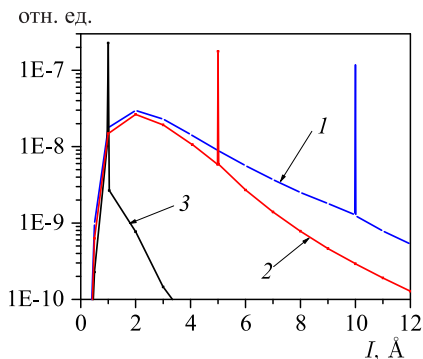


Рис. 17. Изменение длины волны моноэнергетических нейтронов с энергией при прохождении 5 м воздуха (I — 10, 2 — 5, 3 — 10 Å)

Как видно из рис. 2, конструкция реактора не позволяет приблизить зеркальные нейтронотводы к поверхности холодного замедлителя ближе, чем на 3–5 м. Естественно, это приводит к ослаблению интенсивности пучка из-за геометрического фактора, а также вследствие рассеяния нейтронов на воздухе. Потери нейтронов пропорциональны квадрату расстояния от поверхности замедлителя. Например, ослабление потока холодных нейтронов в условиях ИБР-2М из-за геометрического фактора на расстоянии 3 м от поверхности замедлителя составляет ~ 460 раз, на расстоянии 5 м — ~ 1600 .

Кроме того, холодные нейтроны, пролетая по воздуху, меняют энергию, рассеиваются, поглощаются и т.д. При этом холодные нейтроны могут как «нагреваться», так и «охлаждаться». На рис. 17 показано «размывание» холодных нейтронов по энергии с начальной длины волны 1, 5 и 10 Å при прохождении слоя воздуха 5 м. Доля нейтронов, не испытавших столкновений при прохождении 5 м воздушного пространства с атомами воздуха, следующая: 1 Å — 75 %, 5 Å — 63 %, 10 Å — 46 %. Таким образом, кроме потерь от геометрического фактора почти половина холодных нейтронов теряется еще и из-за рассеяния на воздухе.

Повысить плотность потока холодных нейтронов на входе зеркального нейтронотвода можно, изменив конструкцию реактора на конструкцию с тангенциальным расположением пучков, как это принято во многих нейтронных источниках, например, в SNS или в ILL в Гренобле (рис. 18) [14].

Конструкция реактора с тангенциальным расположением нейтронных пучков (далее ИБР-2N₀) представлена на рис. 19. В реакторе используется

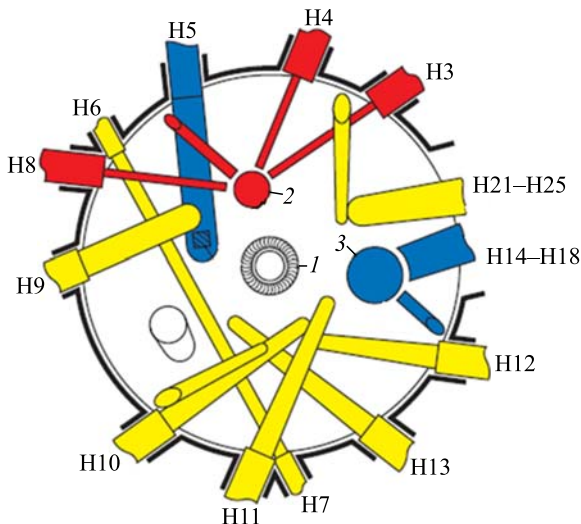


Рис. 18. Нейтронные каналы реактора ILL в Гренобле: 1 — активная зона; 2 — горячий источник; 3 — холодный замедлитель. Видно близкое к замедлителям расположение пучков [14]

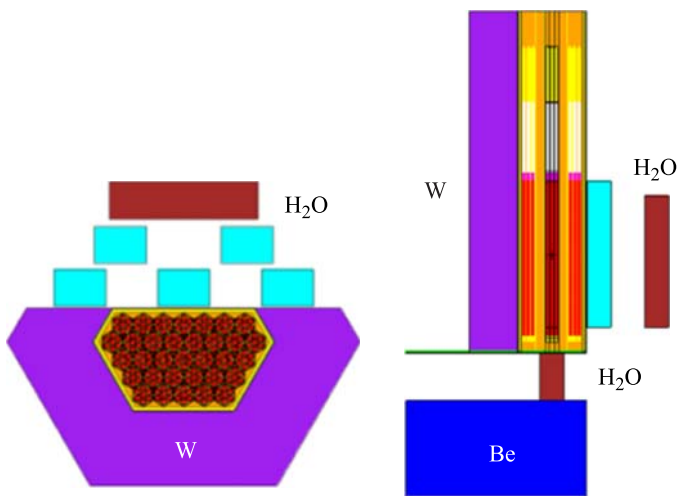


Рис. 19. Расчетная модель реактора ИБР-2М с компактной активной зоной с топливом из PuN и с тангенциальным расположением нейтронных пучков

компактная активная зона с топливом из PuN. Водяной замедлитель расположен снизу активной зоны. Поток тепловых нейтронов «подпирается» бериллиевым отражателем.

Основные нейтронно-физические характеристики этого реактора следующие:

- мощность — 2 МВт;
- $K_{эф} = 1,03$;
- время жизни мгновенных нейтронов $\tau = 3,6 \cdot 10^{-8}$ с;
- длительность вспышки быстрых нейтронов — 160 мкс;
- плотность потока тепловых нейтронов на поверхности плоского замедлителя $\Phi_{th} = 4,36 \cdot 10^{12}$ см⁻² · с⁻¹.

Насколько эффективным по сравнению с ИБР-2М может быть такой реактор для экспериментов с тепловыми и холодными нейтронами при прочих равных условиях, можно оценить, используя выражение (2) для плотности потока нейтронов на образце:

— в пучке ИБР-2М

$$\Phi'_{\text{sample}}(\text{ИБР-2М}) \approx \frac{S\Phi_{2\pi}}{2\pi L^2} K_c;$$

— в пучке ИБР-2№

$$\Phi''_{\text{sample}}(\text{ИБР-2№}) \approx \frac{S\Phi_{2\pi}}{2\pi L^2}.$$

Отношение $\Phi''_{\text{sample}}/\Phi'_{\text{sample}}$ дает оценку эффективности самого источника и эффективности использования нейтронов в пучках этого источника:

— для тепловых нейтронов

$$K_{\text{therm}} \approx \frac{\Phi''_{\text{sample}}}{\Phi'_{\text{sample}}} \approx \frac{\Phi'_{2\pi}}{\Phi''_{2\pi}} = \frac{4,36 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}}{3,8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}} = 1,15;$$

— для холодных нейтронов с длиной волны 5 Å при установке зеркального нейтронновода на минимально возможном расстоянии 3 м от поверхности холодного замедлителя ИБР-2М

$$K_{\text{CN}} \approx \frac{\Phi''_{\text{sample}}}{\Phi'_{\text{sample}}} \approx \frac{\Phi''_{2\pi}}{\Phi'_{2\pi}} \frac{2\pi L^2}{SK_c} = 1,15 \cdot 460/0,77 \approx 700.$$

Для 5 м выигрыш в использовании холодных нейтронов на пучке ИБР-2№ относительно ИБР-2М составит уже 2920.

Из приведенных выше оценок наглядно видно, что эффективность использования на ИБР-2М холодного замедлителя в силу конструктивных особенностей биологической защиты крайне низка. Реактор ИБР-2№ по использованию холодных нейтронов почти на три порядка лучше ИБР-2М, а по использованию тепловых нейтронов практически сравним с ИБР-2М. Фактически ИБР-2М с радиальным расположением пучков есть высокопоточный импульсный реактор тепловых нейтронов, а ИБР-2№ с тангенциальным

расположением пучков есть высокопоточный импульсный реактор холодных нейтронов. К сожалению, основная проблема — охлаждение компактной активной зоны ИБР-2№ с нижним тангенциальным расположением нейтронных пучков — при сохранении расчетных параметров источника в настоящее время трудно решаемая.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Расчеты показали, что повышение плотности потока тепловых нейтронов в пучках оптимизированного реактора типа ИБР-2М теоретически возможно до $(2,0-2,5) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ путем полной переделки всей конструкции реактора с заменой типа топлива и существенного уменьшения его объема. В принципе возможно повышение выхода холодных нейтронов. Холодный замедлитель на реакторе ИБР-2М в силу конструктивных особенностей биологической защиты используется крайне неэффективно. Эффективность холодного замедлителя теоретически можно повысить почти на три порядка, но только путем полного изменения всей конструкции реактора: необходимо уменьшить объем активной зоны, сменить тип топлива и изменить систему вывода пучков с радиальной на тангенциальную. При этом ввиду высокой радиационной нагрузки использование органических материалов в качестве рабочего тела холодного замедлителя неприемлемо. Техническая реализация указанных выше требований в настоящее время является проблемой.

Таким образом, конструкция реактора ИБР-2, разработанная НИКИЭТ им. Н. А. Доллежаля еще в 1968 г. для генерации импульсов тепловых (нехолодных) нейтронов с средней плотностью потока нейтронов на уровне $10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, оптимизирована удивительно удачно [15].

Авторы признательны В. Л. Аксенову, А. В. Виноградову и Е. П. Шабалину за плодотворные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Драгунов Ю. Г. и др. Модернизация импульсного исследовательского реактора ИБР-2 // Атомная энергия. 2012. Т. 113, № 1. С. 29–34.
2. Ананьев В. Д. и др. Физический пуск модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М). Препринт ОИЯИ Р13-2012-41. Дубна, 2012.
3. Ананьев В. Д., Кузнецов Ю. Н. Комплекс реакторного оборудования реактора ИБР-2М. Пояснительная записка, инв. № ИБР-2/3045. 18 февраля 2002 г.
4. Аксенов В. Л. и др. Высокопоточный источник нейтронов на основе каскадного бустера. Препринт ОИЯИ Р13-2016-49. Дубна, 2016.
5. Aksenov V. L. A 15-Year Forward Look at Neutron Facilities in JINR. JINR Preprint E3-2017-12. Dubna, 2017.

6. *Леваков Б. Г. и др.* Импульсные ядерные реакторы РФЯЦ-ВНИИТФ / Под ред. А. В. Лукина. Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2002.
7. *Колесов В. Ф.* Аperiodические импульсные реакторы: В 2 т. Изд. 2-е, перераб. и доп. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007.
8. *Колесов В. Ф., Хоружий В. Х.* Кинетика каскадных бустеров в аспекте их быстрой работы и безопасности // Труды XII Международной конференции по избранным проблемам современной физики, посвященной 95-й годовщине со дня рождения Д. И. Блохинцева (1908–1979), Дубна, 8–11 июня 2003 г. Дубна: ОИЯИ, 2003.
9. *Беляева А. В. и др.* Основные результаты исследований уран-плутониевого нитридного топлива после облучения в реакторе БОР-60 // ВАНТ. Серия: Материаловедение и новые материалы. 2013. Вып. 2(75). С. 4–10.
10. *Шимкевич А., Прошкин А., Седов А.* Перспективное плотное топливо для энергетических реакторов // Сборник РЕА. 2011. № 10; www.Rosenergoatom.info.
11. *Алексеев С. В., Зайцев В. А.* Нитридное топливо для ядерной энергетики. М.: Техносфера, 2013.
12. *Пепельшев Ю. Н., Тулаев А. Б.* Основные результаты экспериментального исследования спектра нейтронов утечки с поверхности криогенного замедлителя реактора ИБР-2 // Международный семинар по перспективным импульсным источникам нейтронов «PANS-II», Дубна, июнь 1995 г. Дубна: ОИЯИ, 1995.
13. *Ananiev V. et al.* // Nucl. Instr. Meth. В. 2014. V. 320. P. 70.
14. *Guyon H.* Presentation of the High-Flux Reactor of the Institut Laue-Langevin // European Nuclear Conference “ENC 2005”; <https://www.ill.eu/reactor-environment-safety/high-flux-reactor/> GRENOBLE, 2017.
15. *Доллежалъ Н. А., Блохинцев Д. И.* Реактор ИРМ-2 (ИБР-2). Технический проект. Нейтронно-физические расчеты. Инв. № ИБР-2/30. Сентябрь 1968 г.

Получено 26 июня 2017 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 02.10.2017.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,88. Уч.-изд. л. 2,26. Тираж 215 экз. Заказ № 59244.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/