

УДК 621.039.55, 621.039.56

*А. М. Абакумов, Л. А. Тайыбов, Ц. Цогтсайхан*

## Исследование шумов энергии импульсов реактора ИБР-2М

*Исследуются колебания энергии импульсов реактора ИБР-2М методом статистического анализа, дано описание конструктивных особенностей реактора ИБР-2М и приведены его основные параметры, показан принцип создания нейтронных импульсов, изложено описание метода статистического анализа и в дальнейшем приведены расчеты этим методом. На основании полученных данных произведено сравнение оценок среднеквадратичного отклонения с имеющимися результатами за 2012 год.*

*Ключевые слова: активная зона, импульсы мощности, колебания реактивности*

### Об авторах

**Абакумов Алексей Михайлович** – магистрант кафедры ядерной физики государственного университета «Дубна». *e-mail*: alexej.abakumov@yandex.ru. 141981 Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, д. 19.

**Тайыбов Лачын Анвар оглы** – научный сотрудник Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований.

**Цогтсайхан Цолмон** – научный сотрудник Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований.

Исследовательская установка ИБР-2М, в состав которой входит импульсный реактор на быстрых нейтронах, предназначена для использования в качестве импульсного источника нейтронов. Особенностью такого реактора является высокая чувствительность к флуктуациям реактивности. Шумы энергии импульсов реактора, вызванные работой различных технологических систем, влияют на управление реактором, процесс стабилизации мощности, т.е. непосредственно на безопасность и надежность реактора. Анализ шумов ИБР-2М позволяет определить изменения в работе реактора и диагностировать различного рода дефекты еще на ранней стадии их развития. Исследование шумов на протяжении реакторного цикла имеет большое значение для определения надежной и безопасной эксплуатации реактора. В работе представлены результаты применения метода статистического анализа случайных колебаний энер-

гии импульсов ИБР-2М, полученные в отдельном реакторном цикле в конце 2016 г.

### 1. Краткое описание конструктивных особенностей модернизированного реактора ИБР-2М

Ёмкость активной зоны ИБР-2М составляет 69 тепловыделяющих сборок (ТВС) (рис. 1). Топливом служат таблетки втулочного типа, выполненные из  $PuO_2$ . Уровень реактивности регулируется органами системы управления и защиты (СУЗ), представляющими собой вольфрамовые блоки, перемещаемые в матрице стационарных отражателей, выполненных из нержавеющей стали.

### 2. Принцип генерации нейтронных импульсов

Для создания нейтронных импульсов используется модулятор реактивности (рис. 2). Модулятор реактивности состоит из основного (ОПО) и дополнительного (ДПО) подвижных отражателей, заключенных в герметичный кожух и вращающихся в противоположные стороны со скоростью 600 об/мин (ОПО) и 300 об/мин (ДПО) в среде гелия. Ро-

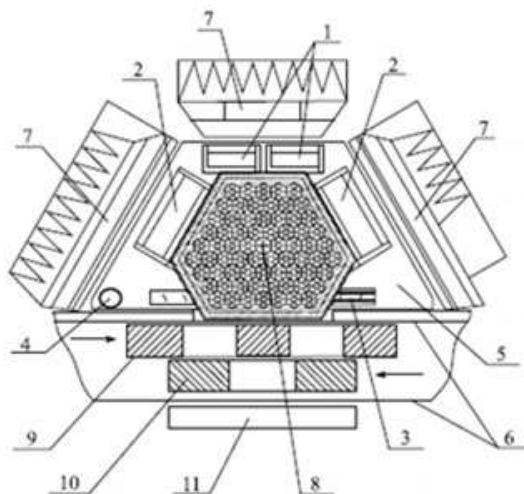


Рис. 1. Поперечный разрез активной зоны (АЗ) реактора ИБР-2М перед загрузкой: 1 – блок аварийной защиты; 2 – компенсирующие органы; 3 – блок промежуточного регулятора; 4 – стержень автоматического регулятора; 5 – матрица стационарного отражателя; 6 – кожух подвижного отражателя; 7 – водяные гребенчатые замедлители; 8 – нейтронный источник; 9 – ОПО; 10 – ДПО; 11 – водяной плоский замедлитель

тор ОПО представляет собой лопасть с тремя «зубьями», выполненными из никелевого сплава, а ДПО – лопасть с двумя «зубьями» также из никелевого сплава. В момент, когда при вращении роторы совпадают, реактор приводится в надкритическое состояние на короткий промежуток времени и генерируется нейтронный импульс, после этого реактор возвращается в стационарное состояние, пока роторы снова не совпадут при вращении.

### 3. Причины возникновения случайных колебаний энергии импульсов ИБР-2М

В реакторе ИБР-2М под понятием шумов будем подразумевать случайные колебания реактивности и вызванные ими случайные колебания энергии импульсов (мощности). Зависимость шумов энергии импульсов от шумов реактивности при малых отклонениях мощности можно определить следующим образом:

$$\frac{dQ}{\langle Q \rangle} \sim \frac{\Delta x k}{\beta_{эф}}, \quad (1)$$

где  $\frac{dQ}{\langle Q \rangle}$  – относительное изменение энергии импульса;  $\Delta x$  – отклонение некоторого реак-

торного параметра  $x$  от своего среднего значения, отвечающего за изменение реактивности;  $\beta_{эф}$  – эффективная доля запаздывающих нейтронов;  $k$  – коэффициент реактивности.

В импульсном режиме эффективная доля запаздывающих нейтронов ИБР-2М  $\beta_{и} = 1.54 \cdot 10^{-4}$ . В стационарном режиме эффективная доля запаздывающих нейтронов  $\beta_{эф} = 2.16 \cdot 10^{-3}$ . Отличие связано с тем, что в импульсном режиме деление происходит в основном только на мгновенных нейтронах, поскольку реактор находится в надкритическом состоянии. Мощность в этом состоянии возрастает от реактивности экспоненциально, т.е. очень быстро. В стационарном состоянии (не импульсном) мощность от реактивности изменяется линейно. Чтобы оба состояния (импульсное и стационарное) можно было бы описать общими уравнениями кинетики, вместо эффективной доли  $\beta_{эф}$  в импульсном режиме вводят так называемую импульсную долю запаздывающих нейтронов  $\beta_{и}$ . Эти доли отличаются друг от друга в 14 раз, следовательно, уровень шумов реактора ИБР-2М в импульсном режиме в 14 раз выше, чем в стационарном. Случайные колебания реактивно-

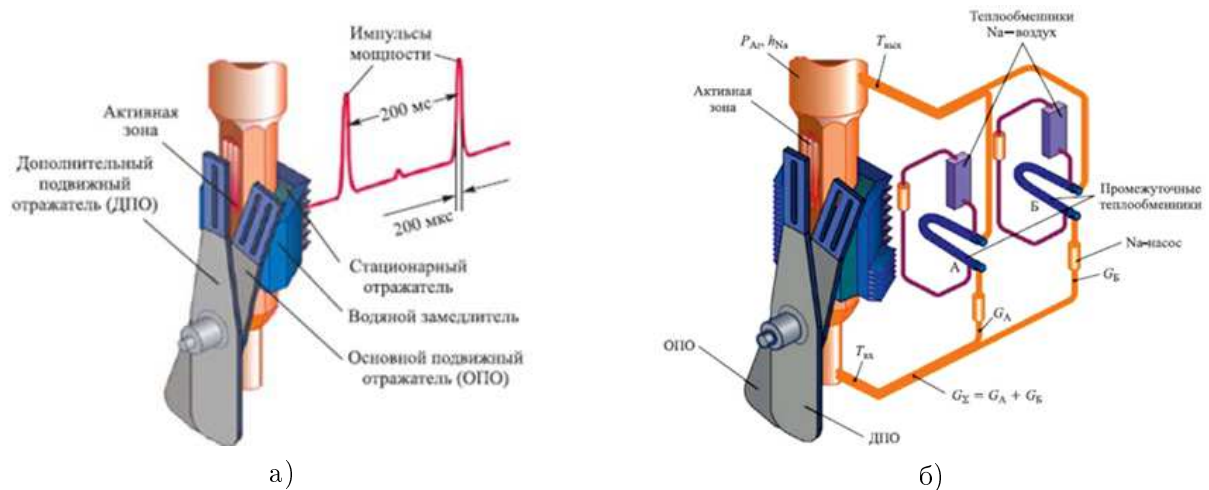


Рис. 2. а) Схема реактора ИБР-2М с иллюстрацией принципа его работы.  
б) Принципиальная схема системы охлаждения реактора ИБР-2М

сти реактора ИБР-2М вызваны работой различных технологических систем. Были определены 4 основных источника шумов:

1. Насосы, которые прокачивают жидкий натрий через активную зону реактора, не могут создать полностью идеально-равномерный поток. Из-за наличия колебаний расхода натрия топливные кассеты подвержены вибрациям. Эти вибрации являются источниками шумов энергии импульсов. Пределы изменений потока натрия составляют 1%.
2. Температурные колебания теплоносителя на входе в активную зону. Температура меняется в пределах нескольких градусов.
3. Вибрации подвижных отражателей. Отклонения ОПО составляют менее 0.1 мм, ДПО – менее 0.3 мм.
4. Стабильную работу реактора обеспечивает система автоматического регулирования. Система стабилизации мощности стремится уменьшить последствия возмущений реактивности, но полностью исключить воздействие случайных изменений реактивности не в состоянии. Частота колебаний, которые все-таки остаются, не превышает 0.1 Гц.

Колебания реактивности неизбежны и в сочетании с высокой чувствительностью реактора вызывают высокий уровень шумов энергии импульсов.

#### 4. Методика измерения энергии импульсов

Обработка данных основывалась на статистическом анализе временных рядов. Исходный временной ряд представляет собой массив последовательных значений энергии импульсов (рис. 3а), зарегистрированных в течение полного реакторного цикла, длительностью до 15 сут. Длина временного ряда составляла  $\sim 10^6$  значений. Данные об энергии импульсов регистрировались с помощью штатных нейтронных детекторов, расположенных вокруг активной зоны (борных ионизационных камер). Накопление данных осуществлялось с помощью системы измерения реакторных параметров, предназначенной для исследования реактора на стадии физического и энергетического пусков. Результаты измерений записывались с частотой повторения импульсов, равной 5 Гц.

#### 5. Статистическая обработка экспериментальных данных

Вначале выполняется фильтрация зарегистрированного в течение всего реакторного цикла исходного временного ряда последо-

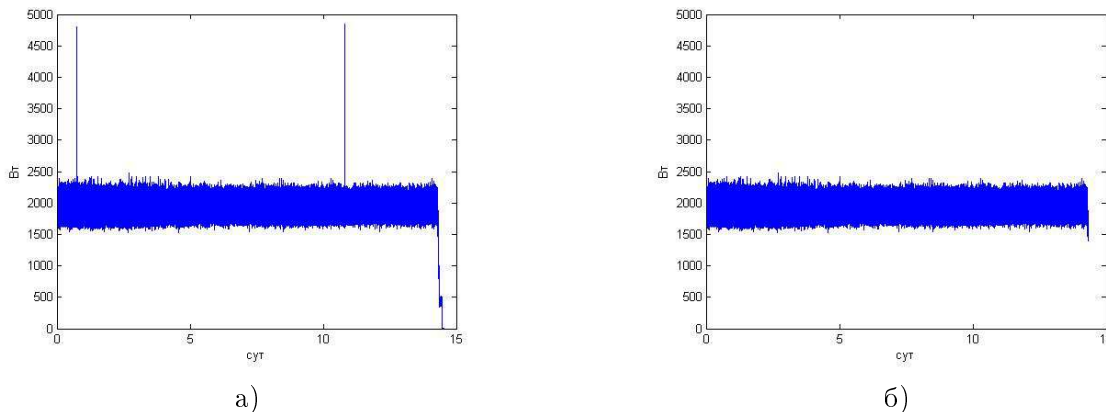


Рис. 3. а) Исходный временной ряд продолжительностью ~ 15 сут.  
 б) Отфильтрованный временной ряд значений энергии импульсов

вательных значений энергии импульсов  $X(t)$  для исключения неправдоподобных значений, вызванных различного рода сбоями измерительной системы или искажениями в канале передачи данных (рис. 3б). Для этого использовался критерий:

$$1400 \leq X(t) \leq 2500 \text{ кВт.}$$

Отфильтрованный временной ряд  $X(t)$  разбивался на  $N$  последовательных рядов  $X_i$  длиной 8192. Каждый временной ряд ( $X_i$ ) описывал ~ 30 минут работы реактора. Далее для каждого ряда  $X_i$  выполнялась обработка, суть которой заключается в следующем:

1. Центрирование  $X_i$  находилось путем удаления среднего значения:

$$X_i(t) = X_i - \langle X_i \rangle,$$

где  $\langle X_i \rangle$  – среднее значение временного ряда  $X_i$ .

2. Для последовательных рядов  $X_i$  устранялся полиномиальный тренд  $Y_i = a + bx + cx^2$ . Коэффициенты  $a, b, c$  определялись методом наименьших квадратов. В дальнейшем исследовался временной ряд:

$$X_i(t) = X_i(t) - Y_i.$$

3. Для каждого ряда  $X_i(t)$  вычисляется конечное дискретное преобразование

Фурье. Спектральная плотность колебаний энергии импульсов реактора:

$$|S_i(f)|^2 = F|X_i(t)|^2 = Re^2|S_i| + Im^2|S_i|,$$

где  $F$  – оператор Фурье.

Теперь имеется набор из 755 спектров, каждый из которых описывает состояние реактора длительностью 30 минут.

Для определения статистического разброса энергии импульсов использовались следующие характеристики:

1. Дисперсия:

$$\sigma_t^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \langle X \rangle)^2,$$

где  $n$  – длина временного ряда.

2. Дисперсия колебаний на средней частоте  $f$ , в диапазоне  $\Delta f$ :

$$\sigma_f^2 = \sum |S_i(f)|^2 \Delta f.$$

3.  $\frac{\sigma_t}{\langle Q \rangle}$  – относительное стандартное отклонение, где  $\langle Q \rangle$  – средняя энергия импульсов.

4. Относительное парциальное среднеквадратическое отклонение:

$$\eta_i = \sqrt{\frac{\sigma_{f,i}^2}{\sigma_f^2}} 100\%.$$

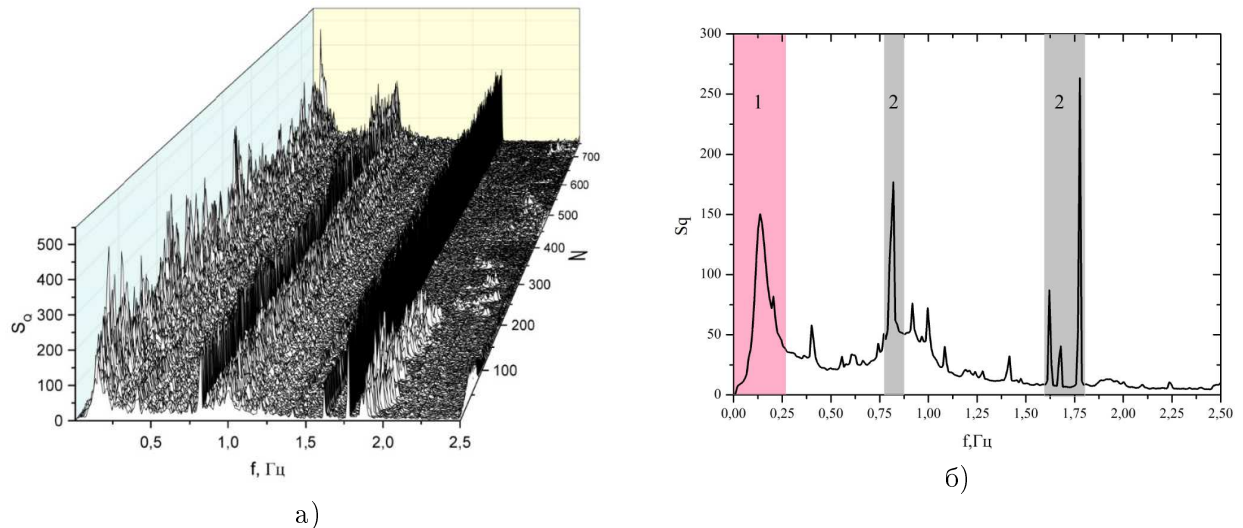


Рис. 4. а) Изменение спектральной плотности колебаний энергии импульсов ИБР-2М за цикл длительностью  $\sim 15$  сут. Приведено 755 спектров. б) Усредненная за весь реакторный цикл работы реактора спектральная плотность колебаний энергии импульсов. Выделенные области соответствуют источникам колебаний различного рода (см. в тексте)

Спектральный состав колебаний энергии импульсов за весь цикл приведен на рис. 4а. Спектральная плотность колебаний слабо меняется во времени на протяжении всего реакторного цикла.

На рис. 4б изображена усредненная за весь реакторный цикл спектральная плотность колебаний. В спектре имеются несколько пиков высокой интенсивности. Эти пики выделены областями 1 и 2. Ранее в работах по изучению природы шумов [11] были проведены эксперименты и сделан вывод, что источники колебаний энергии импульсов имеют свои диапазоны частот. Так, области 1 соответствует так называемая низкочастотная область колебаний. Источниками шумов в данной области являются в основном работа системы охлаждения, а именно вибрация потока натрия через активную зону, а также температурные изменения в активной зоне. Область 1 соответствует диапазону от 0 до 0.26 Гц. Область 2 отвечает за колебания, вызванные вибрацией основного и дополнительного подвижных отражателей. Область 2 имеет диапазон колебаний от 0.78 до 0.87 и от 1.6 до 1.8 Гц.

Изменение величины относительного среднеквадратичного отклонения колебаний энергии импульсов за весь реакторный цикл приведено на рис. 5. Черным цветом изображены изменения относительного среднеквадратичного отклонения колебаний энергии импульсов в низкочастотной области колебаний (0–0.26 Гц), которые не превышают 2.25%. Темно-серым цветом – области колебаний, создаваемых работой модулятора реактивности, которые не превышают 2.5%. Светло-серым цветом показаны изменения относительного среднеквадратичного отклонения колебаний энергии импульсов, вызванных всеми возможными источниками (вибрация подвижных отражателей, работа системы охлаждения, температурные флуктуации, колебания, которые не были исключены работой системы автоматического регулирования), и эти отклонения не превышают 4.75%.

## 6. Анализ экспериментальных данных

Был произведен статистический анализ данных по состоянию реактора ИБР-2М за отдельный реакторный цикл 2016 года, включавший в себя оценки отклонения энергии им-

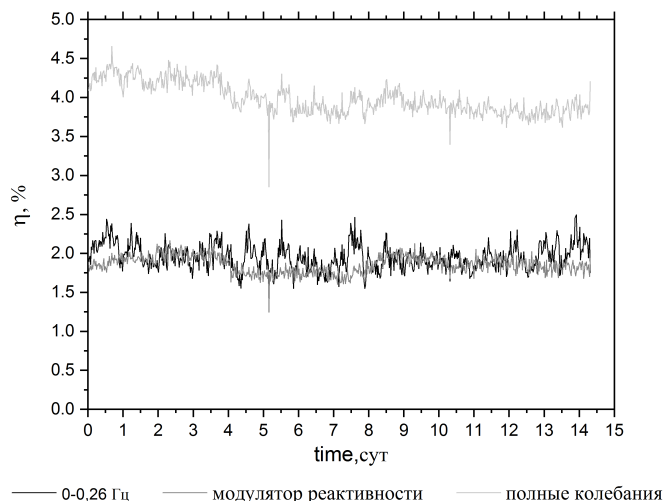


Рис. 5. Изменение величины относительного среднеквадратичного отклонения колебаний энергии импульсов в процессе работы реактора ИБР-2М в отдельном реакторном цикле в 2016 г.

Таблица 1. Сравнение значений величины относительного среднеквадратичного отклонения, полученных в 2012 г. и в 2016 г.

Источники возмущений	цикл 2016 года	цикл 2012 года
Колебания в низкочастотной области	2.25%	1.2%
Вибрация подвижного отражателя	2.5%	4.0%
Полные колебания	4.75%	6.0%

пульсов и их спектрального состава. Сравним полученные данные цикла 2016 года с оценками цикла 2012 года [1] (см. таблицу).

Исходя из данных, приведенных в таблице, можно сделать вывод: со временем величины среднеквадратичного отклонения у реактора ИБР-2М меняются. В ходе работы со временем осуществляется приработка механических частей подвижного отражателя, поэтому мы видим, что среднеквадратичные отклонения энергии импульсов, вызванные работой подвижного отражателя, определенные в 2012 году, больше, чем в 2016 году. Так как вибрация подвижного отражателя является основной составляющей полных колебаний энергии импульсов, то с уменьшением вибраций подвижного отражателя уменьшается значение величины среднеквадратичного отклонения энергии импульсов, вызванных всеми возможными источниками колеба-

ний. А вот значения среднеквадратичного отклонения энергии импульсов, вызванные колебаниями различного рода в области низких частот наоборот, увеличиваются. В настоящее время сложно сказать, почему так происходит. Для этого нужно проводить дополнительные корреляционные исследования колебаний расхода натрия, температуры, мощности и работы автоматического регулятора. В работах по изучению природы шумов [10] были рассчитаны допустимые значения колебаний энергии импульсов. Колебания энергии импульсов не должны превышать 10%. Как мы видим, полученные результаты колебаний энергии импульсов в 4.75% полностью удовлетворяют данному критерию.

### Заключение

Создана программа для статистической обработки временных рядов большой дли-

тельности, с помощью которой были получены данные о шумовом состоянии реактора за весь цикл. Показано, что шумы энергии импульсов меньше допустимых значений и по сравнению с начальным периодом работы реактора ИБР-2М уменьшились. Низкий уровень колебаний энергии импульсов, их спектральный состав показывают надежность работы реактора ИБР-2М.

#### Библиографический список

1. Пепельшев Ю.Н., Рогов А.Д., Цогтсайхан Ц. Статистический анализ флуктуации энергии импульсов реактора ИБР-2М // Препринт ОИЯИ Р 13 - 2012 - 131. Дубна, 2012. С. 1–12.
2. Пепельшев Ю.Н., Цогтсайхан Ц. Влияние шумов натриевой системы охлаждения активной зоны ИБР-2М на колебания реактивности // Препринт ОИЯИ Р 13 - 2014 - 61, Дубна, 2014. С. 1–8.
3. Марачев А.А., Пепельшев Ю.Н., Попов А.К., Сумхуу Д. Анализ динамики импульсного реактора ИБР-2М при статистически оптимальном автоматическом регуляторе // Препринт ОИЯИ Р 13 - 2016 - 65, Дубна, 2016. С. 1–2.
4. Пепельшев Ю.Н., Попов А.К., Сумхуу Д. Модель динамики импульсного реактора ИБР-2М для исследования переходных процессов в широком диапазоне изменения мощности // Препринт ОИЯИ Р 13 - 2014 - 14, Дубна, 2014. С. 5–6.
5. Марачев А.А., Пепельшев Ю.Н., Попов А.К., Сумхуу Д. Реактиметр импульсного реактора периодического действия ИБР-2М // Препринт ОИЯИ Р 13 - 2014 - 44, Дубна, 2014. С. 2–5.
6. Пепельшев Ю.Н., Рогов А.Д. Нейтронно-физические расчеты во время физического и энергетического пусков модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М) // Препринт ОИЯИ Р 13 - 2013 - 3. Дубна, 2013. С. 1–9.
7. Ананьев В.Д., Долгих А.В., Пепельшев Ю.Н., Рогов А. Д. Физический пуск модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М), загрузка активной зоны // Препринт ОИЯИ Р 13 - 2014 - 31. Дубна, 2014. С. 1–3.
8. Ананьев В.Д., Виноградов А.В., Долгих А.В., Едунов Л.В., Пепельшев Ю.Н., Рогов А.Д., Царенков С.А., Заикин А.А., Локанцев А.А. Физический пуск модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М) // Препринт ОИЯИ Р 13 - 2012 - 41. Дубна, 2012. С. 17–22.
9. Ким Тхэ Гюн, Пепельшев Ю.Н., Рогов А.Д. Методика теплофизического анализа ТВЭЛа реактора ИБР-2 // Препринт ОИЯИ Р 13 - 2010 - 58. Дубна, 2010. С. 1.
10. Ананьев В.Д., Виноградов А.В., Долгих А.В., Едунов Л.В., Пепельшев Ю.Н., Рогов А.Д., Заикин А.А. Энергетический пуск модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М) // Препринт ОИЯИ Р 13 - 2012 - 42. Дубна, 2012. С. 16–25.

---

*Поступила в редакцию  
26.12.2019*