

P13-2007-144

Ли Ен Чхан, Ю. Н. Пепельшев, А. Д. Рогов

ИЗМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТА РЕАКТИВНОСТИ РЕАКТОРА  
ИБР-2, СВЯЗАННОГО С ВЫГОРАНИЕМ ТОПЛИВА,  
В ПЕРИОД 1982–2006 ГГ.

Направлено в журнал «Атомная энергия»

Ли Ен Чхан, Пепельшев Ю. Н., Рогов А. Д.

P13-2007-144

Изменение эффекта реактивности реактора ИБР-2, связанного с выгоранием топлива, в период 1982–2006 гг.

Из анализа работы реактора ИБР-2 в период 1982–2006 гг. получена зависимость изменения запаса реактивности от энергонаработки. Показано, что в начале работы реактора кроме эффекта чистого выгорания топлива действуют дополнительные положительные эффекты, связанные, вероятнее всего, с уплотнением топлива и структурным изменением материала активной зоны. Со временем эти положительные эффекты уменьшаются и стремятся к нулю. После 40000 МВт·ч остается только эффект чистого выгорания, и с этого момента запас реактивности линейно уменьшается с коэффициентом  $k_B = -4,2975 \cdot 10^{-5} \%/ \text{МВт}\cdot\text{ч}$ . Получена также формула для вычисления коэффициента энергонаработки в любой момент времени работы реактора. Коэффициент энергонаработки состоит из двух составляющих: коэффициента чистого выгорания и положительного коэффициента реактивности.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2007

Li Yong Chan, Pelyolyshev Yu. N., Rogov A. D.

P13-2007-144

The Change of Reactivity Effect in the IBR-2 Pulsed Reactor Related to Burn-up in the Period 1982–2006

From the analysis of operation data of the IBR-2 pulsed reactor in the period 1982–2006 the dependence of extra reactivity as a function of energy production of the reactor has been obtained. It shows that at the beginning of the reactor operation in addition to the pure burn-up effect, there is also a positive effect probably related to the densification of fuel and structural changes of materials in the core. The effect decreases with time and tends to zero. Only the effect of pure burn-up remains after the 40000 MW·h burn-up, and from this point the extra reactivity is linearly decreased with the coefficient  $k_B = -4.2975 \cdot 10^{-5} \%/ \text{MW}\cdot\text{h}$ . The formula to calculate the energy production coefficient of reactivity at any time of the reactor operation has also been obtained. The energy production coefficient of reactivity consists of two components: the coefficient of pure burn-up and additional positive coefficient of reactivity.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2007

## ВВЕДЕНИЕ

В декабре 2006 г. успешно завершил свою работу импульсный реактор периодического действия ИБР-2. За время эксплуатации с 1984 по 2006 г. реактор наработал в общей сложности 87400 МВт·ч. За это время общий баланс реактивности существенно изменялся, во-первых, естественным образом за счет выгорания топлива, во-вторых, при периодической замене подвижных отражателей и, в-третьих, за счет частичной перегрузки и догрузки топлива. В работе представлено изменение запаса реактивности от энергонаработки за практически полный период работы реактора на мощности с 1982 по 2006 г. Изучена общая картина изменения баланса реактивности и определен абсолютный эффект выгорания.

Ранее баланс реактивности на ИБР-2 проводился на коротких интервалах времени [1] и эпизодически. Было отмечено, что с 1982 по 1985 г. реактивность существенно не изменялась с энергонаработкой. Затем уменьшение запаса реактивности стало более заметным [2]. Позднее было показано, что с 1987 по 1992 г. эффект выгорания стабилизировался и стремился к расчетному значению [3]. Полная детальная картина изменения баланса реактивности за весь период работы реактора в этих работах не могла быть изучена, поскольку использовались данные на сравнительно коротких интервалах времени и в основном в начальный период эксплуатации реактора.

Для определения баланса реактивности за полный период работы реактора использовались данные, измеряемые в единой системе штатного контроля реактора: положение всех органов регулирования, температура на входе и выходе из активной зоны и расход натриевого теплоносителя в первом контуре системы охлаждения активной зоны. Баланс реактивности определялся в каждом реакторном цикле (178 циклов) при достижении состояния импульсной критичности при мощности, практически равной нулю, т. е. исследовался баланс реактивности на «холодной машине». Отметим, что реактор ИБР-2 эксплуатировался в т. н. циклическом режиме: обычно две недели — работа на мощности, две недели — перерыв (нулевая мощность), затем указанный цикл повторялся до проведения ежегодных планово-предупредительных работ, когда реактор останавливался на три месяца. Далее этот ежегодный цикл периодически повторялся с остановками реактора на замену подвижного отражателя.

В условиях импульсной критичности для реактора «нулевой» мощности (холодный реактор) уравнение баланса реактивности имеет вид [1]

$$\sum_{i=1}^4 [k_i(z_i) - k_i(z_{0i})] + k_T(T_{\text{вх}} - T_{\text{вх}0}) + k_G(G^2 - G_0^2) + \rho_{\text{э}} + \rho_x = 0, \quad (1)$$

где  $k_i(z_i)$  — кривая эффективности  $i$ -го блока регулирования;  $k_T$  — изотермический коэффициент реактивности ( $-0,01\beta_{\text{эф}}/^\circ\text{C}$ );  $k_G$  — гидродинамический коэффициент реактивности ( $-1,27 \cdot 10^{-5}\beta_{\text{эф}}/(\text{м}^3/\text{ч})^2$ );  $\rho_{\text{э}}$  — изменение реактивности, связанное с энергонаработкой;  $\rho_x$  — реактивность, обусловленная возможной неизвестной причиной, не учитываемой в формуле (1);  $T$  и  $G$  — температура и расход теплоносителя первого контура системы охлаждения активной зоны. Нижний индекс «0» означает опорные (базовые) значения параметров, соответствующих исходному состоянию реактора. В качестве исходных (базовых) значений параметров были взяты параметры, характеризующие состояние импульсной критичности на момент начала анализируемого периода (октябрь 1982 г., энергетический пуск). В качестве исходных опорных данных были приняты значения, используемые в работах [2, 3]: положение всех органов регулирования КО1, КО2, ПР и АР — 280, 200, 200, 200 мм соответственно, температура натрия на входе в активную зону —  $278^\circ\text{C}$  и расход натрия в первом контуре системы охлаждения активной зоны —  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Из (1) видно, что в состоянии импульсной критичности основными факторами, влияющими на реактивность в данном анализе, являются температура, расход натрия и энергонаработка. Кроме этого, как показано в работе [2], состояние стационарных отражателей и тепловой бетонной защиты во многом определяет неизвестный компонент реактивности  $\rho_x$ . Для того чтобы выделить изменение реактивности, связанное только с энергонаработкой, необходимо, чтобы баланс реактивности выполнялся не только для температуры и расхода теплоносителя, но и для стационарных отражателей и тепловой защиты. Тогда все состояния реактора сопровождались бы одинаковыми условиями относительно основных факторов, влияющих на реактивность. Например, состояние стационарных отражателей определяет случайное изменение реактивности от цикла к циклу, а состояние тепловой и бетонной защиты — изменение реактивности от одной остановки реактора на летний период планово-предупредительных работ до другой.

Учитывать состояние бетонной защиты не так просто. Как показали результаты исследований, проведенных в 2006 г., тепловая инерция бетонной защиты (постоянная времени изменения температур в различных местах защиты) в несколько раз меньше постоянной времени самой медленной составляющей в балансе реактивности для отдельного цикла. Это указывает на то, что не только сама температура, но и последствия ее изменения влияют на

реактивность, что подтверждает вывод работы [1] о том, что одной из возможных причин изменения реактивности является миграция воды в бетоне от горячих мест к холодным. Состояние бетонной защиты зависит от нескольких факторов, например от средней мощности реактора в предыдущем цикле, длительности остановки реактора между циклами, атмосферных условий (через открытую систему охлаждения защиты) и пр. Поскольку средняя мощность реактора в цикле постоянна, продолжительность остановки играет самую большую роль. Отсюда видно, почему критичность после остановки на три месяца (планово-предупредительные работы) и критичность после остановки на одну или две недели (после реакторного цикла) существенно различаются между собой.

Для исследования реактивности в зависимости от энергонаработки удобно рассматривать изменение запаса реактивности. Запас реактивности относительно базовых значений температуры и расхода натрия определяется из выражения

$$\rho_{\text{зап}} = \sum_{i=1}^4 k_i(z_{\text{max } i}) - \left( \sum_{i=1}^4 k_i(z_i) + k_T(T_{\text{вх}} - T_{\text{вх}0}) + k_G(G^2 - G_0^2) \right), \quad (2)$$

где  $\sum_{i=1}^4 k_i(z_{\text{max } i})$  есть полная эффективность органов регулирования. Используя выражение для баланса реактивности (1), получаем

$$\sum_{i=1}^4 k_i(z_i) + k_T(T_{\text{BX}} - T_{\text{BX}0}) + k_G(G^2 - G_0^2) = \sum_{i=1}^4 k_i(z_{0i}) - \rho_{\text{э}} - \rho_x,$$

из которого следует

$$\rho_{\text{зап}} = \sum_{i=1}^4 [k_i(z_{\text{max } i}) - k_i(z_{0i})] + \rho_{\text{э}} + \rho_x, \quad (3)$$

где  $z_{\text{max } i}$  — положение  $i$ -го органа регулирования в активной зоне, соответствующее вводу максимальной реактивности. Слагаемое под символом суммы в уравнении (3) есть константа, означающая запас реактивности в опорный (базовый) момент времени. При условии, если неизвестным эффектом реактивности  $\rho_x$  можно пренебречь, изменение запаса реактивности есть чистый эффект энергонаработки. В реальных условиях эксплуатации запас реактивности в зависимости от энергонаработки вычисляется по данным штатных приборов по формуле (2). Результат вычислений показан на рис. 1. Резкие скачки реактивности в точках 3 и 6 связаны с догрузкой топлива. Кроме того, из рис. 1 видно, что на кривой запаса реактивности есть точки с нетипичными (аномальными) значениями. Как показывает анализ, эти точки в

основном отражают изменение баланса реактивности в циклах, следующих непосредственно после планово-предупредительных работ. Для проведения анализа на больших интервалах времени (несколько лет и более) эти точки являются выбросами, и их можно исключить из исходного набора данных. Тогда неопределенность состояния бетонной защиты и стационарных отражателей, не учитываемая в балансе реактивности (реактивность  $\rho_x$  в уравнении (3)), вызывает лишь незначительный шум, и им в данном анализе можно пренебречь. Некоторые события, значительно повлиявшие на реактивность в ходе эксплуатации реактора, отмечены в таблице.

**Некоторые события в ходе эксплуатации реактора, резко влияющие на реактивность**

Событие № (точки на рис. 1)	Дата	Причина
1	05.01.1982	Первый анализируемый цикл
2	15.10.1987	Замена подвижных отражателей
3	22.03.1993	Перегрузка топлива
4	15.03.1995	Замена подвижных отражателей
5	01.07.1996	Перегрузка топлива
6	24.06.2004	Замена подвижных отражателей, догрузка топлива
7	04.12.2006	Последний цикл

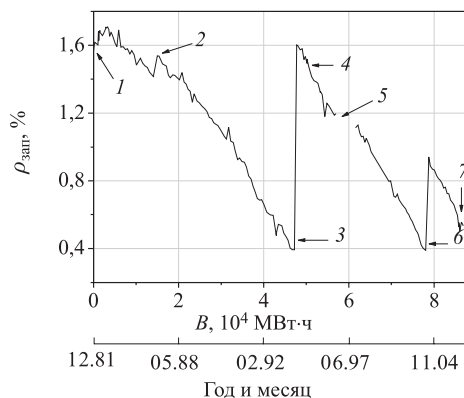


Рис. 1. Изменение запаса реактивности в процессе эксплуатации реактора ИБР-2 с 1982 по 2006 г.

Поскольку запас реактивности при эксплуатации ИБР-2 изменяется ступенчато, для последующего анализа все отрезки кривой смещены так, чтобы функция реактивности не имела разрывов и изменялась непрерывно. Предварительно были удалены выбросы реактивности в точках сразу после планово-предупредительных работ. Полученный непрерывный вид функции запаса реактивности показан на рис. 2.

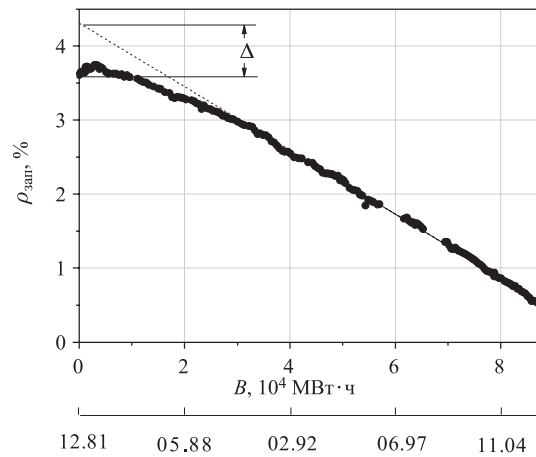


Рис. 2. Непрерывное изменение запаса реактивности. • — экспериментальные точки; — — аппроксимированная кривая; ····· — эффект чистого выгорания; Δ — прибыль реактивности за счет положительного эффекта

Из рис. 2 видно, что после 40000 МВт·ч запас реактивности уменьшается линейно, что отражает чистый эффект выгорания. Если бы наблюдался только эффект чистого выгорания  $\rho_{\text{в}}$ , то запас реактивности должен был уменьшаться линейно сразу после энергетического пуска и выражаться следующим образом:

$$\rho_{\text{зап}} = B_0 + \rho_{\text{в}} = B_0 + k_{\text{в}} \cdot B, \quad (4)$$

где  $B_0 = 3,609\%$  — первоначальное значение запаса реактивности в январе 1982 г.,  $k_{\text{в}}$  — коэффициент выгорания отрицательного знака. На первом этапе эксплуатации реактивность даже увеличивалась. Этот процесс продолжался в течение двух лет. Затем реактивность уменьшается со скоростью, стремящейся к постоянному значению. Этот факт показывает, что в начале работы реактора параллельно с чистым эффектом выгорания топлива действуют также и некоторые положительные эффекты реактивности  $\rho_{\text{доп}}$ . Одно из возможных объяснений положительного эффекта связано, например, с уплотнением топлива, структурными изменениями в материале активной зоны и т. д. Со временем темп этих изменений уменьшается и, наконец, их влияние на реактивность исчезает. Из анализа кривой запаса реактивности

следует, что дополнительные эффекты реактивности в зависимости от энергонаработки можно представить в виде

$$\rho_{\text{доп}} = a(1 - \exp(-B/T_1)) + bB \exp(-B/T_2)[(B - c)^2 - d], \quad (5)$$

где  $a$  — асимптотическое значение положительного эффекта реактивности,  $T_1, T_2$  — константы спада;  $b, c, d$  — аппроксимирующие параметры, не имеющие физического смысла. Тогда общий эффект энергонаработки получается сложением приведенных выше двух эффектов  $\rho_{\text{доп}}$  и  $\rho_{\text{в}}$ , а запас реактивности определяется в виде

$$\rho_{\text{зап}} = B_0 + k_{\text{в}} \cdot B + a(1 - \exp(-B/T_1)) + bB \exp(-B/T_2)[(B - c)^2 - d] \quad (6)$$

Аппроксимируя кривую запаса реактивности на рис. 2, получаем шесть искомых параметров:  $k_{\text{в}} = -4,2975 \cdot 10^{-5} \text{ \%}/\text{МВт}\cdot\text{ч}$ ,  $T_1 = 11823 \text{ МВт}\cdot\text{ч}$ ,  $T_2 = 6274 \text{ МВт}\cdot\text{ч}$ ,  $a = 0,7023 \text{ \%}$ ,  $b = 3,429 \cdot 10^{-13} \text{ \%}$ ,  $c = 1,8489 \cdot 10^4$ ,  $d = 1,1057 \cdot 10^8$ .

Коэффициент энергонаработки ( $k_{\text{э}}$ ), определяемый как изменение запаса реактивности на единицу энергонаработки, можно получить, дифференцируя соотношение (6)

$$k_{\text{э}} = k_{\text{в}} + \frac{a}{T_1} \exp(-B/T_1) + b \exp(-B/T_2) \left[ \left(1 - \frac{B}{T_2}\right) ((B - c)^2 - d) + 2B(B - c) \right]. \quad (7)$$

Изменение  $k_{\text{э}}$  от энергонаработки показано на рис. 3. Как и ожидали, этот коэффициент в начале кривой имеет большое положительное значение, но быстро уменьшается до своего постоянного предельного значения  $k_{\text{в}} = -4,2975 \cdot 10^{-5} \text{ \%}/\text{МВт}\cdot\text{ч}$ , которое практически совпадает с теоретическим значением коэффициента выгорания  $-4,5032 \cdot 10^{-5} \text{ \%}/\text{МВт}\cdot\text{ч}$  (см. [3]).

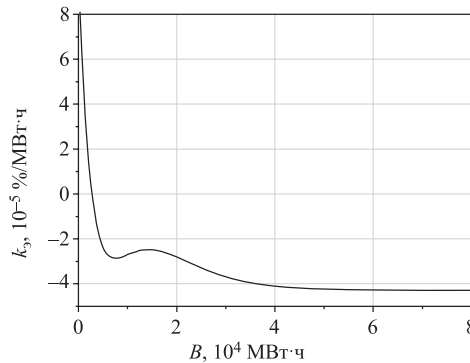


Рис. 3. Изменение коэффициента энергонаработки



Рассмотрим дополнительные положительные эффекты реактивности начального этапа работы реактора. Из соотношения (5) получается интегрированный положительный эффект (рис. 4, *a*) и коэффициент положительного эффекта реактивности (рис. 4, *б*). На рис. 4, *a* асимптотическое значение интегрированного эффекта совпадает с прибылью реактивности ( $\Delta$ ) на рис. 2.

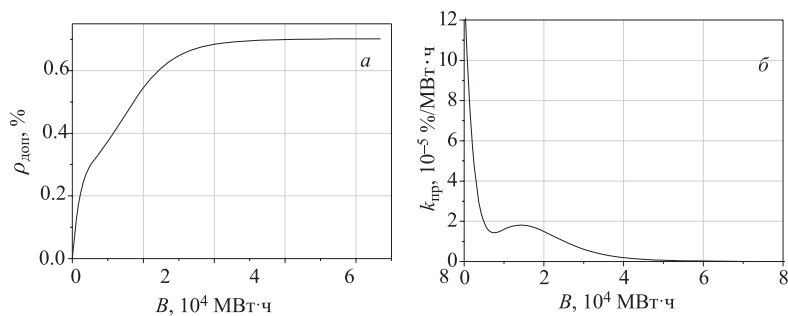


Рис. 4. Дополнительный эффект реактивности на начальном этапе работы реактора: *a*) интегрированный дополнительный эффект реактивности; *б*) коэффициент дополнительного эффекта реактивности

Таким образом, уплотнение топлива и другие возможные эффекты, доминирующие в реакторе в начальный период его работы, увеличивают реактивность приблизительно на 0,7% и приводят с точки зрения запаса реактивности к продлению срока службы реактора. Положительная компонента коэффициента энергонаработки в начале эксплуатации имеет довольно большое значение и вначале быстро, а затем умеренно уменьшается, а после 40000 МВт·ч практически равна нулю.

## ВЫВОДЫ

Из анализа работы реактора ИБР-2 в период с 1982 по 2006 г. получена зависимость изменения запаса реактивности от энергонаработки.

Показано, что в начале работы реактора кроме чистого эффекта выгорания действуют дополнительные положительные эффекты, связанные, вероятнее всего, с уплотнением топлива и структурными изменениями материала активной зоны. Со временем эти эффекты уменьшаются и стремятся к нулю.

После 40000 МВт·ч остается только эффект чистого выгорания, и с этого момента запас реактивности линейно уменьшается с коэффициентом  $-4,2975 \cdot 10^{-5} \text{ \%}/\text{МВт}\cdot\text{ч}$ .

Из обработки экспериментальных данных получена формула для вычисления коэффициента энергонаработки в любой момент работы реактора. Коэффициент энергонаработки состоит из двух составляющих: чистого выгорания и дополнительного положительного эффекта реактивности.

Авторы статьи благодарят А. К. Попова за полезные замечания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Ананьев В. Д., Смирнов В. С., Хан Пхун Ги, Шабалин Е. П.* Изучение эффектов реактивности в реакторе ИБР-2 методом баланса. Препринт ОИЯИ Р13-85-339. Дубна, 1985.
2. *Ананьев В. Д., Киселев М. А., Красных В. К.* Определение эффекта реактивности, связанного с выгоранием топлива реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р3-89-612. Дубна, 1989.
3. *Ананьев В. Д., Киселев М. А.* О стабилизации эффекта реактивности, связанного с выгоранием топлива реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р3-94-494. Дубна, 1994.

Получено 27 сентября 2007 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 23.10.2007.

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

Усл. печ. л. 0,68. Уч.-изд. л. 0,82. Тираж 305 экз. Заказ № 55927.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)