



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

РЗ-94-494

В.Д.Ананьев, М.А.Киселев

О СТАБИЛИЗАЦИИ
ЭФФЕКТА РЕАКТИВНОСТИ,
СВЯЗАННОГО С ВЫГОРАНИЕМ ТОПЛИВА
РЕАКТОРА ИБР-2

1994

О стабилизации эффекта реактивности,
связанного с выгоранием топлива реактора ИБР-2

Приведены результаты измерения медленного изменения реактивности реактора ИБР-2, связанного с выгоранием топлива, проводимого с 1984 по 1992 год. Обнаружена, начиная с 1990 года, стабилизация изменения реактивности в зависимости от выработанной энергии. Измеренное значение $dp/dE = -4,7 \cdot 10^{-3} \pm 1,5 \cdot 10^{-4} \beta_{эфф} / \text{МВт} \cdot \text{сутки}$ совпадает с расчетным значением эффекта реактивности, связанного с выгоранием топлива, $-5 \cdot 10^{-3} \beta_{эфф} / \text{МВт} \cdot \text{сутки}$. Получена оценка числа импульсов мощности реактора $2,9 \cdot 10^8$, достаточного для существенного уменьшения паразитных эффектов реактивности, в частности уплотнения топлива.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1994

Перевод авторов

Anan'ev V.D., Kiselev M.A.

P3-94-494

About Stabilization of Reactivity Effect Caused
by Fuel Depletion at the IBR-2 Reactor

The results of the measurement of reactivity slow change connected with fuel depletion at the IBR-2 reactor are presented. The measurement were carried out from 1984 to 1992. Begin with 1990 it has been found the stabilization of reactivity change depends on the reactor energy. Measurement value $dp/dE = -4,7 \cdot 10^{-3} \pm 1,5 \cdot 10^{-4} \beta_{эфф} / \text{MW per day}$ agrees with calculated value of the reactivity effect connected with fuel depletion $-5 \cdot 10^{-3} \beta_{эфф} / \text{MW per day}$. The estimate of the number of power pulses $2,9 \cdot 10^8$ sufficient for the essentially decrease of the parasitic reactivity effects (for example fuel concentrating) has been arrived.

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

Десятилетие работы реактора ИБР-2 на
физический эксперимент посвящается...

Результаты данной работы основываются на измерениях реактивности реактора ИБР-2, проводимых с 1984 по 1992 год.

В работе /1/ была предложена методика измерения эффекта реактивности, связанного с выгоранием топлива. Было показано, что определение эффекта выгорания на "холодном" и "горячем" реакторе даёт одинаковый результат:

$$d\rho/dE = -3 \cdot 10^{-3} \beta_{эфф} / \text{МВт} \cdot \text{сутки}.$$

Вместе с тем, в работе /1/ было показано, что погрешность измерения реактивности по положению импульсной критичности ("холодный" реактор), равная $0,13\beta_{эфф}$, примерно в два раза больше погрешности измерения по установившейся реактивности реактора на мощности 2 МВт в конце цикла ("горячий" реактор), которая равна $0,08\beta_{эфф}$. Поэтому, а также по причинам, изложенным ниже, в данной работе использовались результаты, полученные на "горячем" реакторе.

Полученное в /1/ изменение реактивности за счет выгорания топлива существенно отличалось от расчетного значения $-5 \cdot 10^{-3} \beta_{эфф} / \text{МВт} \cdot \text{сутки}$. Результаты, полученные в /1/, основывались на измерениях, проводимых на реакторе ИБР-2 в период с 1987 по 1989 год. Несоответствие расчетного и наблюдаемого значений требовало проведения дальнейших измерений и анализа, которые были выполнены с 1990 по 1992 год.

В таблице 1 и на рис.1 представлены результаты измерений эффектов реактивности, связанных с выгоранием топлива, полученные для работы реактора с 1987 по 1992 год.

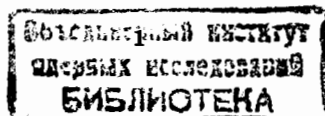


Таблица 1

РРГ	Количество рабочих циклов	$d\rho/dE$ [$10^{-2}\beta_{эфф}/\text{МВт}\cdot\text{сутки}$]	Наработанная энергия E, 10^3 [МВт·час]
1987/88	7	$-0,152 \pm 0,009$	22,28
1988/89	10	$-0,285 \pm 0,007$	27,38
1989/90	8	$-0,395 \pm 0,013$	31,52
1990/91	10	$-0,484 \pm 0,005$	36,70
1991/92	10	$-0,458 \pm 0,010$	42,10

Под реакторным рабочим годом (РРГ) понимается совокупность циклов между двумя летними планово-профилактическими остановами реактора для ремонтных работ (ППР). Как правило, реакторный рабочий год состоит из 10 циклов. Такое временное разбиение представляется необходимым для выполнения идентичности начальных условий, связанных с влиянием бетонной защиты реактора на реактивность и, может быть, с медленной составляющей мощностного эффекта.

Здесь $\beta_{эфф}$ - эффективная доля запаздывающих нейтронов, выбранная нами в качестве единицы измерения реактивности. Для реактора ИБР-2 $\beta_{эфф} = 2,165 \cdot 10^{-3}$. E - наработанная реактором тепловая энергия в МВт·сутках. Обозначим:

$$d\rho/dE = - dR_{уст}/dE. \quad (1)$$

Для каждого рабочего реакторного года зависимость $R_{уст}(E)$ аппроксимировалась линейной функцией методом наименьших квадратов, откуда и определялось $dR_{уст}/dE$. Реактивность, установившаяся в конце цикла, рассчитывалась по формуле:

$$R_{уст} = (R_{к01}(X_{к01}) - R_{к01}(280)) + (R_{к02}(X_{к02}) - R_{к02}(200)) + (R_{пп}(X_{пп}) - R_{пп}(200)) + (R_{ар}(X_{ар}) - R_{ар}(200)) + K_t \cdot (278 - T_{вх}) + K_g \cdot (96 - G_{mv}^2) + K_w(1930 - W), \quad (2)$$

здесь $R_i(X_j)$ - эффективность i-го органа регулирования при его высоте подъема на X_j миллиметров; K_t - изотермический коэффициент реактивности, равный $0,01\beta_{эфф}/\text{град}$; $T_{вх}$ - температура Na на входе в аппарат; K_g - гидродинамический эффект реактивности, равный $0,14 \cdot 10^{-2}\beta_{эфф}/\text{мВ}^2$; G_{mv} - расход Na через активную зону в мВ, приведенный к калибровке расходомеров, существовавшей во время измерения гидродинамического эффекта:

$$G = (2,586 + 11,169 \cdot G_a)/10,4 + (0,181 + 9,904 \cdot G_b)/10, \quad (3)$$

где G_a и G_b - показания расходомеров Na в мВ по петлям А и В первого контура; W - мощность реактора в кВт; $K_w = 0,036 \cdot 10^{-2}\beta_{эфф}/\text{кВт}$ - мощностной эффект реактивности. Мы используем два приближения: первое - K_w не зависит от выгорания топлива, второе - не учитывается расходный эффект реактивности. За начало отсчета критичности принята импульсная критичность реактора при энергопуске (12.05.82).

В общем случае:

$$dR_{уст}/dE = - |d\rho/dE_{выг}| + d\rho/dE_{пар}, \quad (4)$$

где $d\rho/dE_{выг}$ - отрицательное изменение реактивности, связанное с выгоранием топлива; $d\rho/dE_{пар}$ - некое, с нашей точки зрения, паразитное изменение реактивности, имеющее положительный знак. Вопрос о компонентах паразитной составляющей является дискуссионным ввиду сложности их выделения и экспериментального измерения. К таким компонентам может относиться уплотнение топлива, но не исключены и другие

более сложные механизмы положительного изменения реактивности в зависимости от наработанной энергии. Одним из умозрительных процессов, приводящих к уплотнению столба топливных таблеток PuO_2 , может, к примеру, быть выравнивание шероховатостей и неровностей плоской поверхности таблеток под действием динамических процессов, происходящих во время развития импульса мощности. Впрочем, другим процессом, не связанным с импульсным характером работы реактора и известным на стационарных реакторах, является уплотнение топлива, происходящее в результате структурных изменений в керамике. Данная работа не ставит своей целью объяснить физические причины наличия паразитной составляющей изменения реактивности, так как выбор между различными умозрительными качественными механизмами может быть сделан только путем сложных моделирующих расчетов.

Первая попытка измерить "выгорание" реактора была предпринята в работе /2/, где и была высказана гипотеза об уплотнении столба топливных таблеток вследствие тепловых ударов во время импульсов мощности. Однако анализ изменения реактивности "холодного" реактора за 1984-1985 год дал нулевой результат. Это означает, что в первые два года работы реактора $|d\rho/dE_{\text{выг}}| \approx d\rho/dE_{\text{пар}}$ и результирующий эффект был ненаблюдаем, $d\rho/dE \approx 0$. В работе /1/ $|d\rho/dE_{\text{выг}}| > d\rho/dE_{\text{пар}}$, и поэтому удалось вычислить $d\rho/dE$, но оставался вопрос об объяснении нестабильности $d\rho/dE$ от одного РРГ к другому. Измерения в течение 1990/91 и 1991/92 РРГ (стабильность $d\rho/dE$) позволяют утверждать, что производная паразитного эффекта реактивности по выработанной энергии застabilizировалась на каком-то минимальном значении, не исключено, что нулевом. Усредняя по 1990/91 и 1991/92 РРГ, получаем

$$d\rho/dE = - 4,71 \cdot 10^{-3} \pm 1,5 \cdot 10^{-4} \beta_{\text{эфф}}/\text{МВт} \cdot \text{сутки}. \quad (5)$$

Полученное значение $d\rho/dE$ близко к расчетному $-5 \cdot 10^{-3} \beta_{\text{эфф}}/\text{МВт} \cdot \text{сутки}$ - это является важным аргументом в пользу того, что к 1990 году $d\rho/dE_{\text{пар}}$ уменьшилось до нулевого значения. Достигнутое совпадение расчетного и экспериментального эффектов реактивности хорошо видно на рис. 2.

Полученные результаты позволяют оценить количество импульсов мощности, необходимых для уменьшения и стабилизации паразитных эффектов реактивности, - $2,9 \cdot 10^8$. Не исключено, что такого числа импульсов достаточно для максимального уплотнения топлива.

Представляет интерес различие в поведении реактивности "холодного" (импульсная критичность) и "горячего" реакторов, наблюдавшееся в 1984-1988 годах в начальный период работы реактора на физэксперимент и представленное на рис. 2-4. В идеальном случае изменение реактивности, представленное на этих рисунках, должно интерполироваться параллельными прямыми как для "холодного", так и для "горячего" реактора. Однако первые два цикла в каждом реакторном году явно выпадают из линейной зависимости, создавая иллюзию большего выгорания в этих циклах работы.

Из рис. 2-4 видно, что с увеличением выгорания топлива отклонение от линейной зависимости для реактивности "холодного" реактора менее заметно. Разность значений реактивности "горячего" и "холодного" реакторов $\Delta\rho$ для первого цикла в каждом реакторном рабочем году постоянно уменьшалась с ростом выгорания и составляла для представленных на рис. 2-4 рабочих реакторных лет:

$$\text{РРГ } 1984/85 \quad \Delta\rho = 0,80 \beta_{\text{эфф}},$$

$$\text{РРГ } 1985/86 \quad \Delta\rho = 0,66 \beta_{\text{эфф}},$$

$$\text{РРГ } 1988/89 \quad \Delta\rho = 0,50 \beta_{\text{эфф}}.$$

Так что к 1992 году отклонения от линейной зависимости реактивности "холодного" реактора от выработанной энергии исчезли. Таким образом, здесь мы имеем дело также с неким

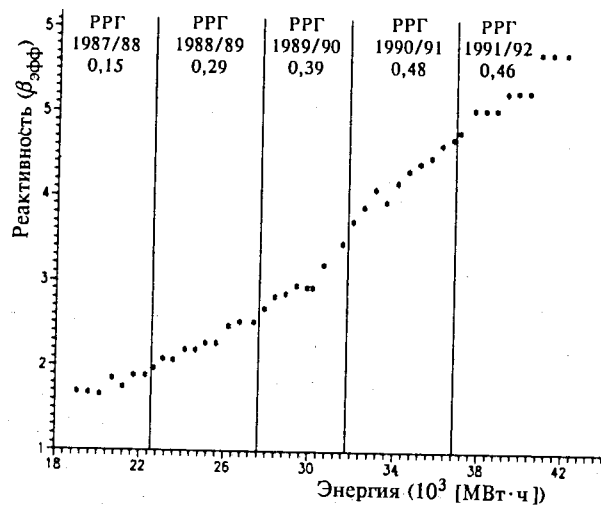


Рис.1. Изменение реактивности $R_{уст}(E)$ от наработанной энергии за период с 1987 по 1992 год. Для каждого реакторного рабочего года (PPG) приведено значение $dR_{уст}(E)/dE$ в единицах $10^{-2} \cdot \beta_{эфф}/\text{МВт}\cdot\text{час}$. $R_{уст}(E)$ - установившаяся реактивность реактора ИБР-2 в конце цикла работы реактора на физический эксперимент (горячий реактор)

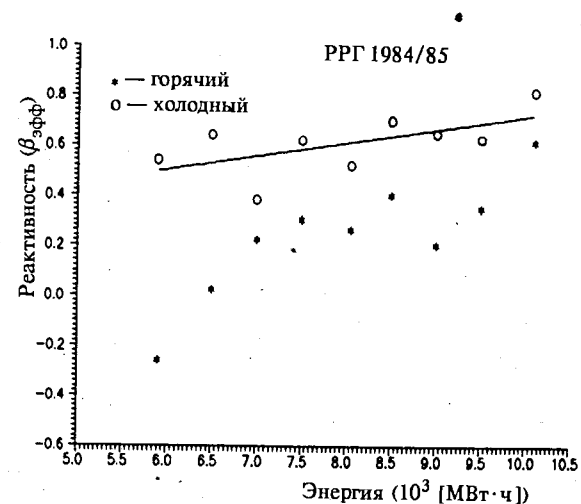


Рис.2. Изменение реактивности $R_{уст}(E)$ от наработанной энергии в 1984-1985 реакторном рабочем году для "горячего" реактора и соответствующие изменения реактивности импульсной критичности ("холодный" реактор)

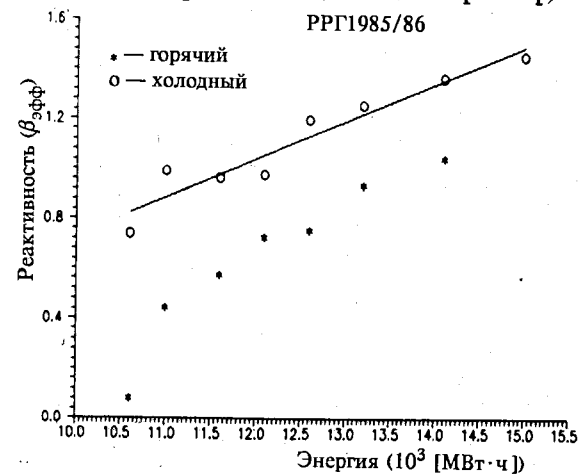


Рис.3. Изменение реактивности $R_{уст}(E)$ от наработанной энергии в 1985-1986 реакторном рабочем году для "горячего" реактора и соответствующие изменения реактивности импульсной критичности ("холодный" реактор)

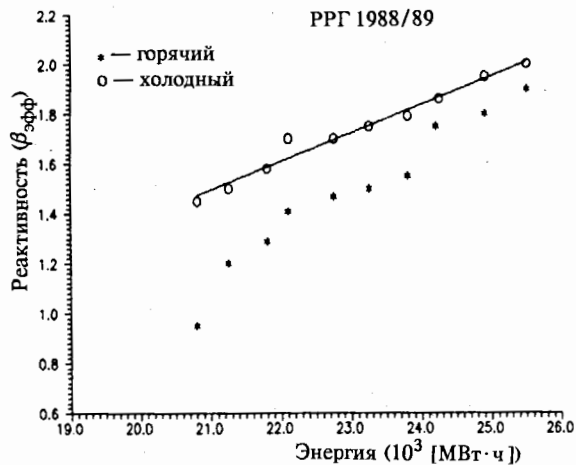


Рис.4. Изменение реактивности $R_{уст}(E)$ от наработанной энергии в 1988-1989 реакторном рабочем году для "горячего" реактора и соответствующие изменения реактивности импульсной критичности ("холодный" реактор)

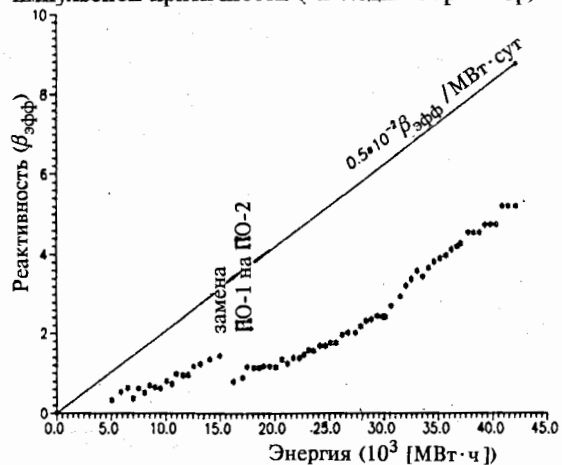


Рис.5. Изменение реактивности $R_{уст}(E)$ от наработанной энергии за период с 1984 (начало работы реактора на физический эксперимент) по 1992 год. Прямая линия описывает изменение реактивности в соответствии с расчетным значением выгорания.

изменяющимся и вырождающимся во времени "паразитным" процессом, характерным для измерений реактивности на "холодном" реакторе. Поэтому измерения реактивности на "горячем" реакторе являются более предпочтительными, особенно в начальный период работы реактора.

Таким образом, нами получено значение эффекта реактивности, связанного с выгоранием топлива (5), совпадающее с расчетным значением. Полученная оценка числа импульсов мощности $2,9 \cdot 10^8$, достаточного для существенного уменьшения паразитных эффектов на фоне эффектов реактивности, связанных с выгоранием топлива, представляется важной характеристикой, которую следует учитывать при конструировании следующей активной зоны.

Авторы считают целесообразным рекомендовать применение отработанной методики определения эффектов реактивности на "горячем" реакторе для постоянного контроля состояния реактора в АСИ ИБР-2. Например, рис.5 демонстрирует график изменения $R_{уст}(E)$ за период с 1984 по 1992 год, который наглядно показывает, что медленных нештатных изменений реактивности, связанных с перемещением ядерно-опасных элементов реактора, за 8 лет его работы не происходило. Скачок реактивности, связанный с заменой ПО-1 на ПО-2 в 1987 году, является, безусловно, ситуацией штатной, которая, как авторы надеются, должна повториться в 1995 году (замена ПО-2 на ПО-3).

Авторы выражают благодарность к.ф.-м.н. В.Л.Ломидзе за внимание к работе и плодотворную дискуссию.

Литература

1. В. Д. Ананьев, М. А. Киселев, В. К. Красных.
"Определение эффекта реактивности, связанного с выгоранием топлива реактора ИБР-2". Сообщение ОИЯИ РЗ-89-612, Дубна, 1989.
2. В. Д. Ананьев, В. С. Смирнов, Хан Пхун Ги, Е. П. Шабалин.
"Изучение эффектов реактивности в реакторе ИБР-2 методом баланса". Препринт ОИЯИ Р13-85-339, Дубна, 1985.
3. Е. П. Шабалин. "Импульсные реакторы на быстрых нейтронах".
Москва: Атомиздат, 1976.
4. В. Л. Ломидзе. "Динамика топлива в импульсном реакторе. Температурные удары в стержнях из таблеток". Атомная энергия, 1973, т. 35, вып. 2, с. 125.

Рукопись поступила в издательский отдел
23 декабря 1994 года.