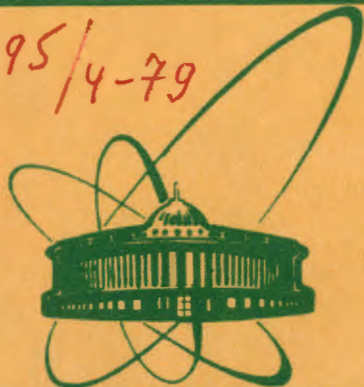


4495/4-79



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

С3488

А-64

P13 - 12465

В.Д.Ананьев, Н.П.Анцупов, А.И.Бабаев,
Б.Н.Бунин, Е.Д.Воробьев, В.В.Дмитренко,
Л.В.Едунов, Ю.В.Кульпин, В.С.Лаврухин,
В.Л.Ломидзе, В.В.Мелихов, Ю.Н.Пепельшев,
В.П.Пластинин, В.С.Смирнов, Ю.В.Фоминых,
Е.П.Шабалин

ФИЗИЧЕСКИЙ ПУСК РЕАКТОРА ИБР-2.
КРИТИЧЕСКАЯ СБОРКА
И ИЗМЕРЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЛОКОВ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ

P13 - 12465

В.Д.Ананьев, Н.П.Анцупов, А.И.Бабаев,
Б.Н.Бунин, Е.Д.Воробьев, В.В.Дмитренко,
Л.В.Едунов, Ю.В.Кульпин, В.С.Лаврухин,
В.Л.Ломидзе, В.В.Мелихов, Ю.Н.Пепельшев,
В.П.Пластинин, В.С.Смирнов, Ю.В.Фоминых,
Е.П.Шабалин

ФИЗИЧЕСКИЙ ПУСК РЕАКТОРА ИБР-2.
КРИТИЧЕСКАЯ СБОРКА
И ИЗМЕРЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЛОКОВ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ



Ананьев В.Д. и др.

P13 - 12465

Физический пуск реактора ИБР-2. Критическая сборка и измерение эффективности блоков системы управления и запуска

Описываются результаты первого этапа физического пуска реактора ИБР-2 без теплоносителя. Определялось фактическое значение критической массы, измерялись эффективности блоков системы управления и защиты /СУЗ/, топливных кассет и других элементов реактора, а также проведена градуировка пусковых каналов по мощности реактора. Для контроля уровня нейтронного потока использовались борные камеры и камеры деления. Измеренное значение критической массы /69,3 кассеты/ совпало с расчетным /71±2 кассеты/. Измерения эффективностей блоков СУЗ проводились динамическими методами при работе реактора в непрерывном режиме. Эффективности блоков оказались в 1,5±2 раза ниже расчетных. Эффективность топливных кассет определялась методом обратного умножения и составила 1,2% ΔK/K в центре и 0,7% ΔK/K на периферии активной зоны реактора. Форма распределения эффективности по объему активной зоны близка к расчетной. Абсолютная мощность реактора измерялась тремя методами: по умножению нейтронов источника, анализу спектральной плотности шумов тока ионизационной камеры и по характеру нагрева активной зоны. Точность измерения - 10%.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.
Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Ananyev V.D. et al.

P13 - 12465

Reactor IBR-2 Physical Start-Up. Critical Assembly and Measuring of the Control Rod Effectiveness

The results of the first stage of IBR-2 physical start-up experiments /without cooling/ are described. The measurements were performed for determining a critical mass, effectiveness of the control rods and fuel assemblies, and the reactor power. Fission and boron chambers were used for neutron flux detecting. Experimental value of critical mass (69.3 assemblies) is near to the theoretical one (71±2 assemblies). Control rod effectiveness turned out to be 1.5±2 times less than the calculated. Fuel assembly effectiveness were measured in subcritical reactor and are equal to 0.012 ΔK/K for the central assembly and 0.007 ΔK/K at the core boundary. The core distribution of the effectiveness is near to theoretical one. The reactor power was measured by means of three methods: by neutron source multiplication, by spectral density of the reactor noise and by core heating analysis. The accuracy of power measurements is about 10 per cent.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

ВВЕДЕНИЕ

Первый этап физического пуска реактора ИБР-2 без теплоносителя включал в себя загрузку активной зоны топливными кассетами, определение фактического значения критической массы, измерение эффективностей блоков управления, контроля и защиты реактора, эффективность топливных кассет и других элементов реактора. Знание этих характеристик необходимо для ядерно-безопасной эксплуатации ИБР-2.

1. КОНСТРУКЦИЯ РЕАКТОРА ИБР-2 И АППАРАТУРА КОНТРОЛЯ

Активная зона ИБР-2 /рис. 1/ набирается из кассет /до 78/ с тепловыделяющими элементами, которые вставляются в опорную решетку с шагом 27 мм и размещаются в двухстенном стальном корпусе. В каждой кассете по 7 твэлов с таблетками из двуокиси плутония, заключенными в стальную цилиндрическую оболочку диаметром 8,6 мм и толщиной стенки 0,45 мм. Высота активной части твэла 445 мм, вес топлива в твэле в среднем ~186 г. Твэлы дистанционированы друг от друга навитой в виде спирали проволокой толщиной 0,5 мм. Семь центральных ячеек зоны занимает канал, нижняя часть которого будет использована для размещения мишени линейного ускорителя, а в верхней части установлен контейнер с бериллиевым блоком объемом 100 см³ и извлекаемый пенал с полоний-бериллиевым источником. С пяти сторон к корпусу зоны примыкают перемещаемые вольфрамовые блоки - исполнительные органы системы управления и защиты реактора /СУЗ/, которые включают в себя два блока компенсации реактивности /КО I и КО II /, два блока медленной аварийной защиты /МАЗ I и МАЗ II /, два блока быстрой аварийной защиты /БАЗ I и БАЗ II /, блок ручного регулятора реактивности /РР/ и выполненный из бериллия стержень автоматического регулятора реактивности /АР/.

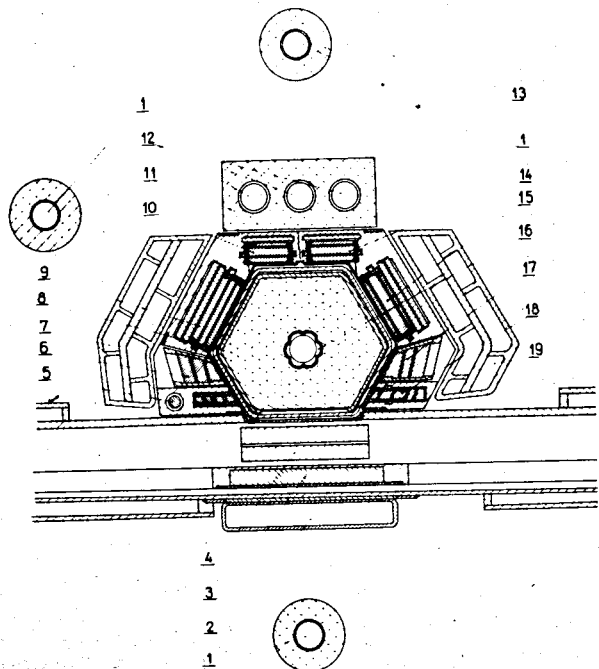


Рис. 1. Реактор ИБР-2, горизонтальный разрез: 1 - штатная камера, 2 - замедлитель ПО, 3 - бериллиевый вкладыш ДПО, 4 - лопасть ОПО, 5 - стержень АР, 6 - блок БАЗ II, 7 - замедлитель КО II, 8 - активная зона, 9 - блок КО II, 10 - блок МАЗ II, 11 - блок ИХЗ, 12 - экспериментальные каналы, 13 - втулка из оргстекла, 14 - блок МАЗ I, 15 - блок КО I, 16 - экспериментальная камера мишени, 17 - блок БАЗ I, 18 - блок РР, 19 - замедлитель КО I.

К наибольшей стороне шестигранника примыкают расположенные соосно роторы основного /ОПО/ и дополнительного /ДПО/ подвижных отражателей. Лопасть ОПО выполнена из стали и имеет эффективную толщину 70 мм, а ДПО представлял собой алюминиевый диск с бериллиевым вкладышем толщиной 40 мм.

С внешней стороны МАЗ установлен выполненный из оргстекла блок имитатора "холодного" замедлителя /ИХЗ/ с размерами 500x340x130 мм. В блоке имеется три вертикальных отверстия диаметром 60 мм, предназначенных для размещения экспериментальных камер.

Более подробно конструкция реактора ИБР-2 описана в работах /1-4/.

Во время проведения критической сборки для контроля уровня нейтронного потока и защиты реактора используется штатная пусковая аппаратура с тремя камерами деления на уране-235 типа RJ-200T /польского производства/. Камеры размещаются в биологической защите реактора на расстоянии 1150 мм от центра активной зоны и могут перемещаться в вертикальном направлении, что позволяет изменять их чувствительность. При опускании в крайнее нижнее положение камеры входят в блоки из оргстекла наружным диаметром 150 мм, расположенные непосредственно в каналах вывода нейтронных пучков. Этим достигается увеличение эффективности камер.

Для увеличения точности определения умножения нейтронов, а также для подключения экспериментальной аппаратуры /аналоговый и цифровой реактиметры, шлейфовый осциллограф, анализаторы и т.д./ дополнительно использовались три экспериментальных канала с заменяемыми камерами типа КНТ-54, КНК-15, RJ-200T и АКЖ-3Т, установленными в ИХЗ и канале мишени /КМ/.

2. ИЗМЕРЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ЗАГРУЗКИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

В целях обеспечения ядерной безопасности набор критической массы реактора осуществлялся в два этапа. Первый этап заключался в загрузке активной зоны топливными кассетами до достижения умножения, приблизительно равного шести-десяти, т.е. такого, при котором реактор находится в заведомо подкритическом состоянии и одновременно имеется возможность произвести первую грубую оценку эффективности блоков регулирования и защиты, а также уточнить положение физических центров /положение, соответствующее максимальной реактивности/ основного и дополнительного подвижных отражателей.

Второй этап заключался в догрузке активной зоны топливными кассетами в количестве, необходимом не только для выхода в критическое состояние на запаздывающих нейтронах, но и для последующего вывода реактора на импульсную критичность.

Перед загрузкой топливных кассет все ячейки активной зоны были заполнены кассетами-имитаторами, отличающимися от топливных только тем, что таблетки в них вместо двуокиси плутония изготовлены из меди. В центре активной зоны был установлен пусковой нейтронный источник интенсивностью $0,91 \cdot 10^7$ нейтр./с.

Проводились измерения скорости "нулевого" счета по всем каналам в зависимости от положения блоков регулирования и подвижного отражателя /ПО/, а также при наличии и отсутствии водяных замедлителей. Естественно, что максимальное изменение скорости света наблюдалось для тех каналов, камеры которых располагались непосредственно за перемещаемым блоком /рис. 2/.

Для загруженной имитаторами активной зоны с источником скорость "нулевого" счета N_{oi} штатных каналов / i - номер канала / в положении их максимальной эффективности составила /5±8/ имп./с, а экспериментальных каналов - /8±50/ имп./с, причем статистическая ошибка в определении "нулевого" счета не превышала 2%. Скорость счета при извлеченном источнике практически равнялась нулю.

Загрузка топлива в активную зону проводилась путем замены кассет-имитаторов на топливные кассеты последовательно по одной кассете от центра активной зоны к ее периферии. После загрузки очередной партии кассет, определяемой в каждом конкретном случае соображениями ядерной безопасности, проводилось измерение скорости счета по каждому i -тому каналу регистрации нейтронов $N_{\rho i}$ и вычислялось значение обратного умножения $Y_i^{-1} = N_{oi} / N_{\rho i}$. Затем определялось

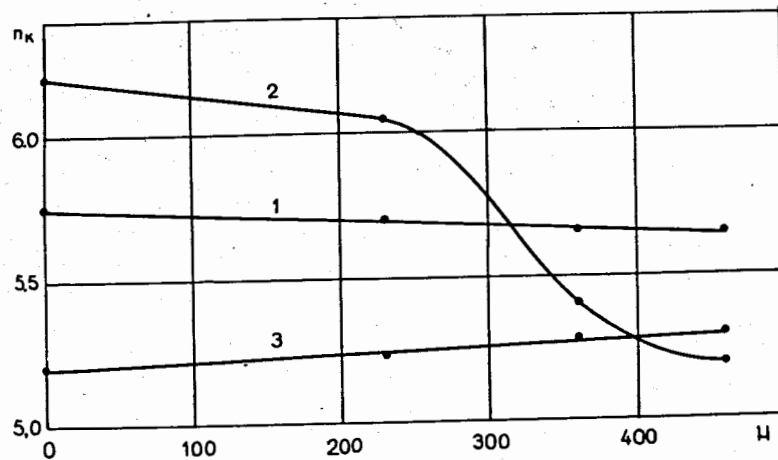


Рис. 2. Скорость счета штатных каналов в зависимости от положения КОП /мм/ для незагруженной зоны: 1 - камера за ИХЗ, 2 - камера за КОП, 3 - камера за ПО.

экстраполированное значение критической массы топлива $M_{\text{эстр.}}^K$ /или критического числа загруженных топливных кассет/ путем линейной экстраполяции функции $Y_i^{-1} = f_i(M)$ по двум последним точкам до пересечения с прямой $Y_i^{-1} = 0$ /рис. 3/.

Определение подкритичности реактора на этой стадии проводилось по формуле $\rho = Y^{-1} \cdot A$, где $\rho = K_{\text{эфф}} - 1 / K_{\text{эфф}}$ - реактивность, а A - коэффициент, учитывающий такие факторы, как разные чувствительности детектора по отношению к нейтронам источника и нейтронам деления /предварительно рассчитываются по методу Монте-Карло/, разную ценность нейтронов источника и нейтронов деления, распад полоний-бериллиевого источника и появление новых источников в результате спонтанного деления загружаемого Pu-240. Вклад нейтронов спонтанного деления определялся экспериментально путем измерения скорости счета нейтронов при извлеченном пусковом источнике. С учетом погрешности в определении коэффициента A , статистической погрешности и неопределенности при выборе "нулевого" счета

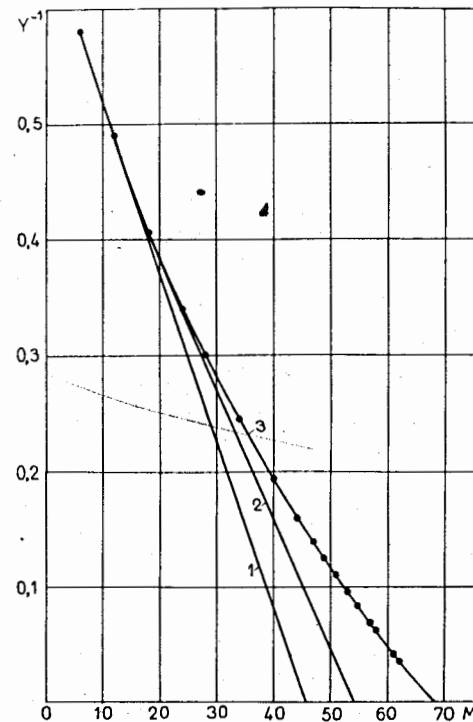


Рис. 3. Зависимость обратного умножения Y^{-1} от количества загруженных кассет /кривая 3/. 1, 2 - первая и вторая экстраполяции в критическое состояние.

для промежуточного положения блоков СУЗ, суммарная относительная погрешность определения ρ составляла $\pm 15\%$.

При достижении умножения ~ 50 проводились грубые измерения полных и дифференциальных эффективностей блоков СУЗ, в результате которых выяснилось, что первоначально принятые крайние верхние их положения не соответствуют положениям максимальной реактивности. После корректировки положений блоков верхние концевые выключатели КОI, КОII, МАЗI и МАЗII были опущены соответственно на 61, 50, 43 и 42 мм, что привело к уменьшению хода этих блоков, который составил у КОI и КОII - 410 мм, у МАЗI - 449 мм, а у МАЗII - 444 мм. Корректировка положений РР и АР не проводилась.

На этой же стадии изучалось влияние водяных замедлителей на эффективность блоков СУЗ. Слив воды из замедлителей практически не влиял на нее.

Критическое состояние реактора было достигнуто в двух вариантах загрузки активной зоны: в "центральной" и "периферийной" /рис. 4/ при загрузке 70 и 74 топливных кассет соответственно /расчетное значение критической центральной загрузки - 69-73 кассеты/.

В "периферийном" варианте в ячейки 2,3,5,6 были загружены кассеты-имитаторы. В "центральной" же варианте оставались загруженными кассетами-имитаторами ячейки 78,62,71,70,69,68,57,75.

3. ИЗМЕРЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЛОКОВ СУЗ И СТАЦИОНАРНЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ

Градуировка эффективности блоков СУЗ проводилась динамическими методами при работе реактора в непрерывном режиме на мощности от 3 до 100 Вт. Для оперативного контроля мощности и определения реактивности в переходных процессах использовался аналоговый реактиметр, подключенный к токовой ионизационной камере АКЖ-3Т, расположенной в ИХЗ. Непрерывная регистрация сигналов мощности и реактивности осуществлялась самопишущими потенциометрами.

Кроме того, для более точного контроля уровней мощности, а также для определения реактивности по периоду разгона реактора на запаздывающих нейтронах и по обратному умножению нейтронов использовались штатные каналы. В ряде случаев реактивность определялась с использованием цифрового реактиметра и шлейфового осциллографа типа К-115, подключаемых к установленной в канале мишени камере /типа КНК-15 или КНТ-14/. Осциллограммы обрабатывались затем на ЭВМ БЭСМ-6 по программе инверсной кинетики.

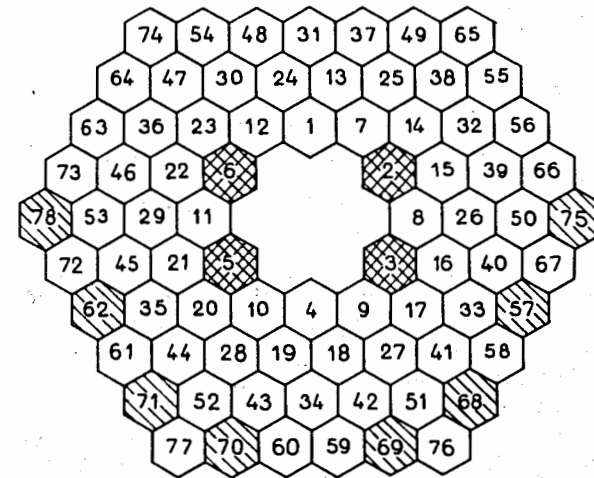


Рис. 4. Картограмма загрузок активной зоны ИБР-2: - ячейки с кассетами-имитаторами в варианте "центральной" загрузки, - ячейки с кассетами-имитаторами в варианте "периферийной" загрузки.

Градуировка дифференциальной эффективности КО, РР и АР производилась участками по ~ 10 мм. Для компенсации вводимой реактивности и стабилизации мощности при "взвешивании" какого-либо из блоков, например КОI или РР, использовался другой - блок КО и наоборот. Реактивность определялась по показаниям аналогового реактиметра. При этом погрешность измерений не превышала $\pm 5\%$ и определялась в основном погрешностью в фиксировании положения "взвешиваемого" блока и аппаратурной погрешностью реактиметра / $\pm 3\%$ /, выявленной на стадии его предпусковых испытаний.

Следует отметить, что определение дифференциальных эффективностей КОI и КОII динамическим методом оказалось возможным только для их верхних участков /155-410 мм/. Поэтому градуировка начальных участков проводилась методом обратного умножения. Изменение реактивности рассчитывалось по формуле:

$$\Delta\rho = N_0^* \cdot (1/N_2 - 1/N_1),$$

где N_1 и N_2 - скорости счета до и после внесения возмущения в реактор, соответственно, а N_0^* - приведенная "нулевая" скорость счета, определяемая по результатам измерения скоростей счета при внесении заранее известной реактивности.

Полная погрешность измерения реактивности методом обратного умножения определяется систематической погрешностью измерения N_0 /+7%/ и статистической погрешностью измерения N_1 и N_2 . Если измеряемые реактивности велики ($\sim 10^{-2} K_{эфф}$), вклад статистической погрешности не превышает 2%. При измерении малых реактивностей ($\sim 10^{-4} K_{эфф}$) вклад статистической ошибки в полную погрешность становится доминирующим, причем последняя может превышать $\pm 20\%$.

Из анализа данных по измерению дифференциальных эффективностей одних и тех же участков КО в динамических и подкритических экспериментах следует, что относительное расхождение результатов не превышало 5% от измеренных значений.

На рис. 5 представлены зависимости изменения реактивности при перемещении блоков регулирования для варианта "периферийной" загрузки активной зоны. Наличие максимумов на градуировочных кривых РР и АР при 360 мм и 425 мм, соответственно, свидетельствует о неправильном выборе крайних положений перемещения этих блоков. Средние дифференциальные эффективности на линейных участках градуировочных кривых составляют для КО 2,3-2,4 $\cdot 10^{-2} \beta/\text{мм}$, для РР - 0,5 $\cdot 10^{-2} \beta/\text{мм}$, а для АР - 0,05 $\cdot 10^{-2} \beta/\text{мм}$ /расчетное значение эффективной доли запаздывающих нейтронов $\beta = 0,002165 K_{эфф}$ /. Значения полной эффективности органов регулирования /табл. 1/ определялись на основании градуировочных кривых /рис. 5/ и по результатам подкритических экспериментов, а для РР и АР дополнительно уточнялись компенсационным методом, т.е. по перемещению отградуированного органа /КО II / до компенсации введенной реактивности.

Динамические эксперименты по определению эффективности органов аварийной защиты /АЗ/ проводились при срабатывании каждого блока АЗ в отдельности. Перед срабатыванием АЗ мощность реактора равнялась ~ 100 Вт. Реактивность определялась аналоговым реактиметром от сигнала камеры АКЖ-3Т в ИХЗ или от камеры КНК-15 в канале мишени. Одновременно при сбросе АЗ регистрировалась кривая спада мощности шлейфовым осциллографом. Полные эффективности БАЗ I и БАЗ II, определенные по показаниям реактиметра, составили 0,66 β и 0,61 β , соответственно, что практически совпадает с результатами измерений методом компенсации по перемещению КО I (0,62 β).

Из результатов обработки осциллограммы следует, что за 0,02 с каждым блоком БАЗ вводится отрицательная реактивность 0,35 β /рис. 6/. Такой же эффект был определен методом обратного умножения при смещении БАЗ на 20 мм.

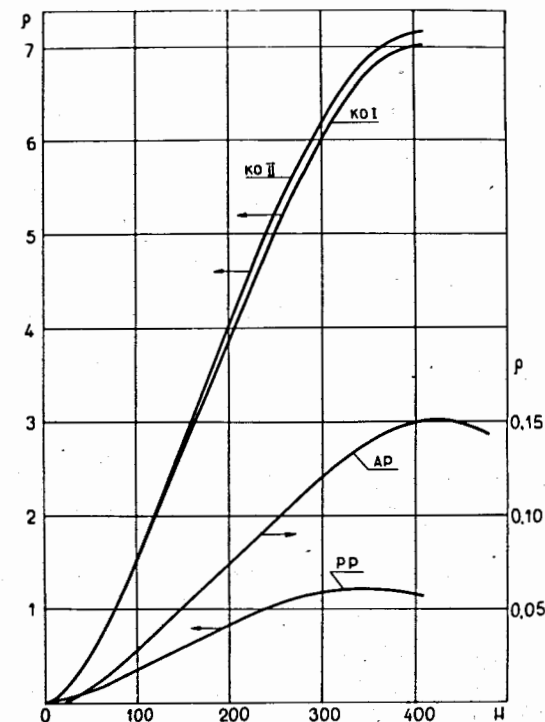


Рис. 5. Градуировочные характеристики органов регулирования. ρ - реактивность в долях β , H - высота подъема органа, мм.

Таблица 1

Эффективность блоков СУЗ реактора ИБР-2

Наименование блока	Полная эффективность, Дифференциальная эффективность,	
	$K_{эфф} \cdot 10^2$	$K_{эфф} \cdot 10^4 / \text{мм}$
КО I	1,50±0,12	0,50±0,03
КО II	1,55±0,12	0,52±0,03
РР	0,26±0,02	0,11±0,01
АР	0,032±0,002	0,011±0,001
БАЗ/один блок/	0,14±0,01*	-
МАЗ/один блок/	0,60±0,06	-

* За время 0,02 с одним блоком БАЗ вводится отрицательная реактивность $\sim 0,08 \cdot 10^{-2} K_{эфф}$

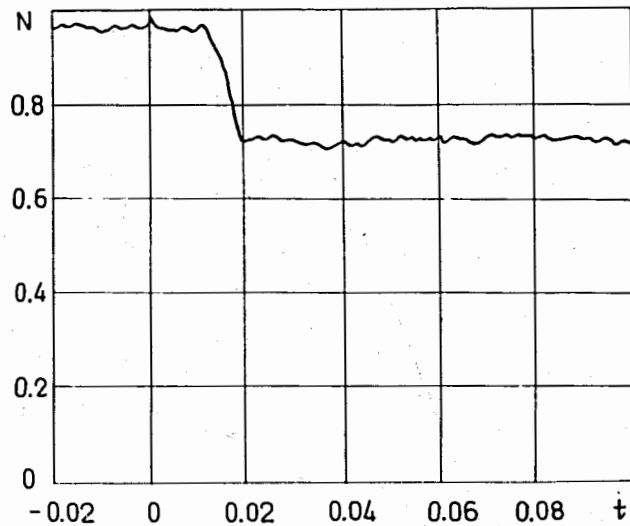


Рис. 6. Осциллограмма тока камеры N /отн.ед./ при сбросе БАЗИ. t - время /с/ с момента подачи сигнала на сброс.

При определении эффективности блоков МАЗ обнаружилось, что результаты динамических измерений аналоговым реактиметром с камерой АКЖ-3Т в ИХЗ и анализа кривой спада мощности, полученной на шлейфовом осциллографе с камерой КНК-15, не согласуются между собой /эффективность одного блока МАЗ равнялась 4β и $2,7\beta$, соответственно/, и отличаются от результатов подкритических экспериментов / 3β - МАЗ I, $3,5\beta$ - МАЗ II и 6β - МАЗ I + МАЗ II /. Эти расхождения, по-видимому, объясняются тем, что при выводе МАЗ плотность потока нейтронов у камер, расположенных в ИХЗ, и штатных камер изменяется сильнее, чем в активной зоне. Для проверки этого предположения был проведен эксперимент со сбросом МАЗ, в котором реактивность измерялась реактиметром с камерой КНТ-4 в канале мишени, а ток камеры АКЖ-3Т в ИХЗ записывался шлейфовым осциллографом. В этом случае эффективность одного блока МАЗ составила по показаниям аналогового реактиметра $2,8\beta$, а по результатам обработки осциллограммы - $4,1\beta$. Таким образом, подтвердилось предположение о недостоверности результатов измерений эффективности МАЗ по сигналам камер в ИХЗ. В табл. 1 приведено среднее значение эффективности одного блока МАЗ по данным динамических измерений при расположении камер в канале мишени, а на рис. 7 - временная диаграмма вывода реактивности при сбросе МАЗ.

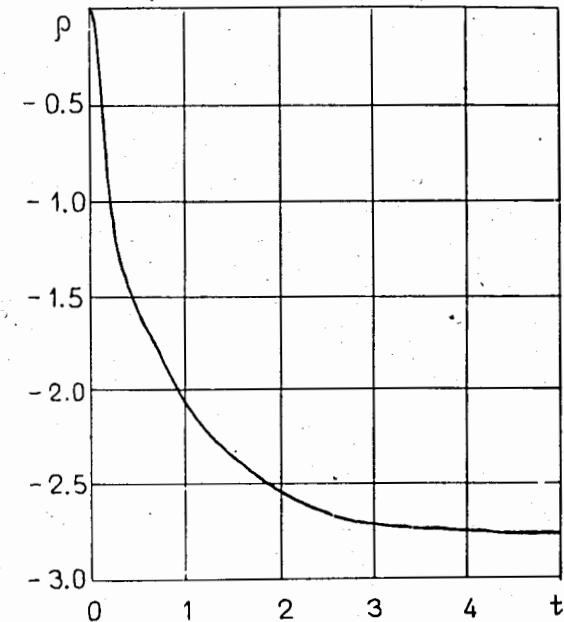


Рис. 7. Временная диаграмма вывода реактивности при сбросе МАЗ. ρ - реактивность в долях β , t - время, с.

При построении градуировочной характеристики блоков МАЗ в верхнем участке перемещения максимумов не было обнаружено, что свидетельствует о правильном выборе крайних положений МАЗ, гарантирующем от ввода положительной реактивности в начальный момент после сброса АЗ.

Для варианта "центральной" загрузки активной зоны определение эффективности блоков СУЗ проводилось только по результатам подкритических экспериментов методом обратного умножения. Данные этих измерений свидетельствуют о том, что эффективность блоков КО и МАЗ почти на 10% ниже эффективности аналогичных блоков в варианте "периферийной" загрузки активной зоны. Объясняется это тем, что в варианте "центральной" загрузки /рис. 4/ центр активной зоны как бы удален от КО и МАЗ /со стороны КО и МАЗ недогружено 8 топливных кассет/ и смещен в сторону ПО.

Для варианта "центральной" загрузки активной зоны оценивалось влияние блока ИХЗ на эффективность МАЗ и КО. Измерения проводились методом обратного умножения по сигналу штатной

камеры, расположенной за ПО. Значение приведенного "нулевого" счета было откорректировано по перемещению градуированного блока /PP/, поэтому погрешность измерений не превышала 10%. В результате этих экспериментов выяснилось, что при удалении ИХЗ эффективность МАЗ увеличивается на 23%, а эффективность КО уменьшается на 20%.

Для оценки влияния колебаний блоков СУЗ на флуктуации энергии импульсов реактора, а также для оценки величины допустимого "отодвигания" стационарного отражателя блоки КОI и PP отсоединялись от приводов; перемещением КОII реактор выводился на умножение ~ 1000 ; стационарный отражатель /КО вместе с защитой/ откатывался от активной зоны на 2 мм. Изменение реактивности регистрировалось по трем счетным каналам и составило $- 1,6 \cdot 10^{-3} K_{эфф}$.

4. РЕАКТИВНОСТЬ КАССЕТ И ОБРАЗЦОВ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Эксперименты по "взвешиванию" топливных кассет и кассет-имитаторов проводились методом обратного умножения при $Y \sim 500 \div 1000$. Результаты измерений регистрировались по четырем счетным каналам. Для каждой кассеты эффект реактивности измерялся дважды: при извлечении кассеты из ячейки активной зоны и при загрузке в ячейку /рис. 4/. Всего было "взвешено" 29 кассет /15 топливных и 14 имитаторов /табл. 2//.

Приведенные в табл. 2 погрешности измерения реактивности не включают в себя систематической погрешности в определении приведенного "нулевого" счета / $\sim 10\%$ от измеряемого эффекта/.

Для топливных кассет погрешность в оценке реактивности определялась, в основном, разбросом счета по регистрирующим каналам, а для кассет-имитаторов - статистической погрешностью.

Эксперименты по "взвешиванию" образцов проводились следующим образом: от активной зоны откатали тележку с подвижным отражателем, и на его месте закрепили устройство, с помощью которого можно было перемещать испытуемые образцы около активной зоны. Измерения проводились методом обратного умножения при $Y \sim 500$, результаты регистрировались по трем счетным каналам. Образцы были изготовлены из стали, меди, вольфрама и бериллия. Соотношение эффективностей образцов, отнесенное к одному и тому же объему, получилось следующим: Fe:Cu:W:Be = 1:1,42:1,5:1,8.

Эффективность железного образца размерами $250 \times 250 \times 40$ мм - 2%. Погрешность измерений $\sim 10\%$.

Таблица 2

Эффекты реактивности при загрузке кассет в активную зону

№ ячейки	Реактивность, $K_{эфф} \cdot 10^2$	
	Топливная кассета	Кассета-имитатор
1	1,16 \pm 0,04	0,13 \pm 0,02
4	1,21 \pm 0,04	0,10 \pm 0,02
5	1,20 \pm 0,04	0,10 \pm 0,02
8	1,16 \pm 0,03	-
14	1,07 \pm 0,02	0,09 \pm 0,02
20	1,28 \pm 0,05	0,10 \pm 0,02
31	0,99 \pm 0,02	0,28 \pm 0,04
35	1,18 \pm 0,05	0,15 \pm 0,02
58	0,96 \pm 0,03	0,31 \pm 0,04
59	1,02 \pm 0,03	0,30 \pm 0,03
61	1,07 \pm 0,03	0,30 \pm 0,03
63	0,92 \pm 0,03	0,27 \pm 0,03
74	0,78 \pm 0,04	0,26 \pm 0,03
75	0,65 \pm 0,03	0,20 \pm 0,03
77	0,86 \pm 0,03	0,27 \pm 0,03

5. ИЗМЕРЕНИЕ АБСОЛЮТНОЙ МОЩНОСТИ РЕАКТОРА

При определении абсолютной мощности реактора использовались следующие методики:

а/ умножение нейтронов источника /источник - спонтанное деление Pu-240 /,

б/ анализ спектральной плотности шумов сигнала ионизационной камеры типа КНК-15 в канале мишени при двух положениях камеры,

в/ тепловой расчет на основании показаний термомпары, помещенной в разборную экспериментальную кассету в центре активной зоны.

Контроль относительного уровня мощности осуществлялся по току камеры АКЖ-3Т в ИХЗ, а также по данным счетных каналов. Заданный уровень мощности поддерживался перемещением КОI. Реактор выводился на мощность ~ 100 Вт, предварительно оцененную по данным одного из счетных каналов, и поддерживался на этом уровне в течение ~ 1 ч. Ток камеры АКЖ-3Т был равен $5,5 \cdot 10^{-5}$ А. При этом среднее значение мощности, рассчитанное по показаниям трехсчетных /штатных/

каналов, составило 87 Вт, по показаниям термопары - 90 Вт, а по данным анализа спектральной плотности шумов - 82 Вт.

При переходе на другой уровень мощности, соответствующий показанию камеры АКЖ-3Т-1, $6 \cdot 10^{-4}$ А /~300 Вт/, среднее значение мощности, определенное по данным счетных каналов, составило 280 Вт, по данным термопары - 280 Вт, а по данным анализа спектральной плотности шумов - 284 Вт. Оцененная погрешность измерений для всех используемых методов равнялась ~10% и определялась либо разбросом счета по каналам /т.е. ошибкой в определении приведенного "нулевого" счета/, либо аппаратурной /~7%/ и статистической /~6%/ погрешностями.

ВЫВОДЫ

1. Расчетная оценка минимальной критической массы /71+2 кассеты/ совпадает с действительным значением /69,3/ в пределах ошибки расчета. В окончательном /периферийном/ варианте композиции активной зоны полное число загруженных кассет составило 74 при запасе реактивности 1% $\Delta K/K$.
2. Эффективность органов СУЗ оказалась существенно /в $1,5 \div 2$ раза/ заниженной по сравнению с данными расчетов. Различие объясняется идеализацией реальной геометрии блоков СУЗ в расчетной модели и отклонениями от проектных требований в процессе сборки стационарных отражателей.
3. Эффективность топливной кассеты и кассеты-имитатора составляет 1,2% $\Delta K/K$ и 0,1% в центре и 0,7% $\Delta K/K$ и 0,3% на периферии активной зоны соответственно. Форма распределения указанных эффективностей по объему активной зоны близка к расчетной. Эффективности образцов, измеренные вблизи границы реактора, относятся как 1:1,42:1,5:1,8 для Fe, Cu, W и Be соответственно.
4. Проведена градуировка пусковых каналов по мощности реактора. Точность измерения абсолютной мощности ~10%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ананьев В.Д. и др. ОИЯИ, РЗ-10888, Дубна, 1977.
2. Ананьев В.Д. и др. ОИЯИ, 13-4392, Дубна, 1969.
3. Рогов А.Д., Шабалин Е.П. ОИЯИ, Р13-9990, Дубна, 1976.
4. Ананьев В.Д. и др. ПТЭ, 1977, №5, с.17.

Рукопись поступила в издательский отдел
17 мая 1979 года.