

Ордена Ленина

Институт атомной

им. И. В. Курчатова

ИАЭ-2189

145

энергии

И. Н. Аборина, Л. В. Комиссаров, Г. Л. Луний

**Подкритическая сборка малого размера
для измерения нейтронно-физических
параметров решеток реактора типа ВВЭР**

ОРДЕНА ЛЕНИНА
ИНСТИТУТ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ им. И. В. КУРЧАТОВА

И.Н. Аборина, Л.В. Комиссаров,
Г.Л. Лукин

ПОДКРИТИЧЕСКАЯ СБОРКА МАЛОГО РАЗМЕРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЕТОВ РЕАКТОРА
ТИПА ВВЭР

Москва
1972

Ключевые слова:
реакторы, подкритическая сборка, эксперимент, конструкция, решетки, нейтронные параметры, распределение тепловых нейтронов, закадмиевые нейтроны, индиевые детекторы, марганцевые детекторы, спектры

0402

А Н Н О Т А Ц И Я

Исследована возможность применения подкритической сборки малого размера для измерения нейтронно-физических характеристик топливных решеток реакторов типа ВВЭР. В качестве источника нейтронов использовался уран-графитовый реактор Ф-1. С помощью индиевых и марганцевых детекторов измерено пространственное распределение тепловых и "закадмиевых" нейтронов по уран-водной решетке высотой 135 см и диаметром 23 см.

Измерены некоторые интегральные характеристики энергетического спектра нейтронов в центральной области сборки при облучении ее тепловыми и закадмиевыми нейтронами.

Обнаружено, что в центральной области сборки устанавливается равновесный энергетический спектр нейтронов, характеризующий бесконечно протяженную решетку.

В В Е Д Е Н И Е

Некоторые опытные данные, относящиеся к нейтронно-физическим параметрам реактора, можно получить из экспериментов, выполненных на подкритических сборках. Такие исследования по сравнению с критическими экспериментами обладают целым рядом преимуществ. Во-первых, нет необходимости сооружать дорогостоящий критический стенд со сложной системой контроля, во-вторых, можно ограничиться минимальным количеством используемого делящегося материала. Все это привело к широкому использованию подкритическихборок для экспериментального исследования размножающих сред. В частности, подкритические сборки используются в экспоненциальных экспериментах для измерения материального параметра решетки, в импульсных экспериментах — для измерения параметров кинетики цепной реакции деления и т.д. Такие эксперименты не требуют высокого потока нейтронов в решетке, и в качестве источника нейтронов используется обычно точечный источник, например полоний-бериллиевый, дающий возможность получить поток нейтронов в решетке около 10^4 – 10^5 н/см²сек.

К другому классу экспериментов относятся измерения тонкой структуры потока нейтронов в элементарной ячейке решетки, нейтронно-физических параметров цепной реакции размножения нейтронов; а также интегральных и дифференциальных характеристик энергетического спектра нейтронов.

В этих случаях требуются более высокие потоки нейтронов — 10^7 – 10^8 н/см²сек, и в качестве источника нейтронов удобнее всего использовать ядерный реактор. Для подкритических экспериментов существенным является требование, чтобы в используемой сборке устанавливался равновесный спектр нейтронов, характеризующий исследуемую топливную решетку. Это обстоятельство налагает определенные ограничения на размер подкритической сборки.

При исследовании решеток, содержащих в качестве замедлителя обычную воду, это требование не является слишком жестким вследствие малых длин замедления и диффузии нейтронов в уран-водных средах. Однако и в этом случае необходимо проведение контрольных экспериментов, указывающих на то, что размеры используемой сборки являются достаточными.

В настоящей работе исследовалась возможность применения подкритической сборки малого размера, высотой 135 см и диаметром 23 см, для измерения интегральных характеристик нейтронного спектра и некоторых параметров размножения нейтронов в различных топливных решетках реакторов типа ВВЭР. При этом в качестве источника нейтронов использовался уран-графитовый реактор Ф-1. Подкритическая сборка размещалась в экспериментальном канале реактора.

1. КОНСТРУКЦИЯ ПОДКРИТИЧЕСКОЙ СБОРКИ

Исследуемая подкритическая сборка (рис. 1) размещена в восьмигранном алюминиевом корпусе с двойными стенками с внешним размером "под ключ" 25 см, высотой 147 см и толщиной стенок 2 мм. Сверху корпус сборки закрывается стальными колпачком толщиной 1 см.

Для фиксации тепловыделяющих элементов в вертикальном положении имеется три направляющих решетки, причем верхняя из них изготовлена из алюминия толщиной 1 см, а две промежуточных — из оргстекла той же толщины. Опорная плита выполнена из алюминия толщиной 2 см.

Все направляющие решетки и опорная плита могут быть легко демонтированы и заменены новыми, что позволяет исследовать решетки с различным шагом топливных элементов. Опорная плита и направляющие решетки скреплены четырьмя стальными стойками диаметром 9,5 мм и высотой 135 см. К стойкам крепится специальное приспособление, с помощью которого решетка может быть легко извлечена из корпуса.

Все направляющие решетки имеют в центре отверстия для установки экспериментального вкладыша (рис. 2а), состоящего из 19 твэлов, фиксируемых верхней и нижней дистанционирующими решетками, изготовленными из алюминия. Имеется еще две промежуточные дистанционирующие решетки из оргстекла толщиной 10 и 1 мм, причем последняя установлена в месте измерения и служит для размещения на ней детекторов нейтронов (рис. 2а). В процессе работы количество элементов во вкладыше по соображениям радиационной безопасности было сокращено до 5 (рис. 2б).

Конструкция центрального твэла экспериментального вкладыша позволяет размещать детекторы в топливе на малой высоте. Разборный твэл состоит из трех частей, соединяемых с помощью резьбы и заполненных блоками из спеченной двуокиси урана (рис. 3).

При облучении в нейтронном потоке сборка опускается на дно вертикального колодца размером 30х30 см, имеющегося в верхнем отражателе уран-графитового реактора Ф-1. При этом дно колодца находится примерно на границе активной зоны, а сам колодец несколько смещен относительно вертикальной оси реактора, имеющего форму сферы (рис. 4). Колодец имеет защиту из тяжелого бетона размером 650х650х350 мм.

В подкритической сборке исследовалась гексагональная решетка твэлов с шагом 12,7 мм. Полное количество элементов в сборке равно 313. Твэлы изготовлены из спеченной двуокиси урана с обогащением 3,5% по изотопу $U-235$. Цилиндрическая оболочка элементов с внешним диаметром 9,1 мм и толщиной 0,65 мм выполнена из цирконий-ниобиевого сплава. Двуокись урана с плотностью $\sim 10,2$ г/см³ имеет форму цилиндра длиной 20–30 мм и диаметром 7,65 мм. Высота твэла по активной части — 125 см.

2. Э К С П Е Р И М Е Н Т

Основная задача эксперимента заключалась в определении пространственной области подкритической сборки, в которой устанавливается равновесный энергетический спектр нейтронов, характеризующий бесконечно протяженную исследуемую решетку. Помимо этого, для проведения последующих измерений необходимо было в области установившегося спектра выбрать место с максимальным потоком нейтронов и определить абсолютный поток нейтронов.

В качестве критериев формирования равновесного спектра нейтронов в некоторой области подкритической сборки было принято:

1. Постоянство величин кадмиевых отношений для резонансного детектора и детектора, сечение которого подчиняется закону $1/\nu$, а также спектральных индексов, являющихся интегральными характеристиками спектра нейтронов.

2. Постоянство указанных выше величин при облучении сборки нейтронами, имеющими существенно различный энергетический спектр.

В экспериментах в качестве детектора I/v использовался марганец. В тепловой области нейтронного спектра сечение марганца подчиняется закону I/v (первый резонанс при энергии $E_{рез} = 340$ эв). Марганец обладает достаточно большим сечением активации в тепловой области спектра ($\sigma_{акт} = 13,2$ барн при $v = 2200$ м/сек) и удобным при измерениях периодом полураспада ($T_{1/2} = 155$ мин).

В качестве резонансного детектора использовался индий, обладающий резонансом в сечении активации при энергии $E_{рез} = 1,46$ эв ($\sigma_{акт} = 30000$ барн) и имеющий сечение в тепловой области $\sigma_{акт} = 194$ барн ($v = 2200$ м/сек) и период полураспада $T_{1/2} = 54$ мин.

При исследовании подкритической сборки измерялись также спектральные индексы, являющиеся интегральными характеристиками спектра нейтронов. Спектральные индексы представляют собой отношения усредненных по исследуемому и известному, например маквелловскому, спектрам нейтронов произведений сечения активации на скорость нейтронов для элементов с завязанностью сечения от энергии, резко отличной от закона I/v :

$$S_i = \left(\frac{A_i}{A_{1/v}} \right)_x / \left(\frac{A_i}{A_{1/v}} \right)_{изв} = \frac{(\sigma_{акт} \cdot v)_x}{(\sigma_{акт} \cdot v)_{изв}}$$

Здесь индексы x и $изв$ относятся к исследуемому и к известному, например маквелловскому, спектрам нейтронов; A_i и $A_{1/v}$ — активности детектора, имеющего характерное, отличное от закона I/v , сечение активации и детектора I/v соответственно.

В качестве детекторов с характерной зависимостью сечения активации от энергии нейтронов были выбраны элементы диспрозия и индия. Сечение активации Dy^{164} при энергии нейтронов от 0 до $E = 0,1$ эв следует закону I/v , а при $E > 0,1$ эв падает быстрее, чем закон I/v . Сечение активации индия, как уже упоминалось, имеет резкий резонанс при энергии 1,46 эв. Таким образом, один из выбранных детекторов Dy^{164} чувствителен к тепловой области энергий, другой In^{115} — к резонансной. В качестве детектора I/v , как и ранее, использовался марганец.

Проводились измерения величин кадмиевых отношений и спектральных индексов при облучении подкритической сборки нейтронами с различным энергетическим спектром. Для того чтобы получить качественно другой спектр нейтронов источника, вся сборка целиком окружалась кадмиевыми листами толщиной 0,5 мм.

При измерении распределений потока нейтронов и величины кадмиевого отношения по высоте сборки детекторы размещались в цирконий-ниобиевой трубке с внешним диаметром 9,1 мм и толщиной стенки 0,65 мм, установленной на месте центрального твэла решетки. При этом детекторы в кадмий и без кадмия чередовались, размещались на расстоянии 39 и 48 мм друг от друга и дистанционировались блоками из оргстекла (рис.5).

Распределения по радиусу сборки измерялись на расстоянии 325 мм от нижней плиты. Детекторы размещались в пене из оргстекла с толщиной стенки 1 мм на расстоянии 12,7 мм друг от друга. В экспериментах использовался кадмий толщиной 0,5 мм. Используемые в этих экспериментах детекторы калибровались в однородном нейтронном потоке в центре графитовой тепловой колонны реактора Ф-1. Расстояние между крайними детекторами при калибровке не превышало 55 мм. Среднеквадратичная ошибка калибровки не превышала 1,3%.

Полученные в эксперименте распределения потока нейтронов и величины кадмиевого отношения по сборке представлены на рис. 6 и 7а. На рис. 7б приведены распределения тех же величин, измеренных в сборке, окруженной со всех сторон кадмиевыми листами.

При измерении спектральных индексов использовались физически тонкие ($\sum d \ll 1$) детекторы из диспрозия и индия. Диспрозиновые детекторы изготовлены из дисперсионного сплава Dy_2O_3 с алюминием марки ПА-4. Толщина детектора 0,1 мм, поверхностная плотность диспрозия 1 мг/см². Индиевые детекторы изготовлены методом вакуумного напыле-

ния индия на алюминиевую фольгу толщиной 0,1 мм. Используемые при измерении спектральных индексов марганцевые детекторы представляли собой фольгу толщиной 0,1 мм из дисперсионного сплава 10 вес.% Mn_2O_3 с алюминием.

Спектральные индексы измерялись в центральной области подкритической сборки, причем измерения проводились как в твэлах, так и в воде. В сборке, окруженной кадмием, спектральные индексы измерены в центральной точке сборки. Расположение детекторов при измерении спектральных индексов и кадмиевого отношения приведено на рис. 8 и 9. Детекторы для измерений в топливном элементе имеют форму дисков диаметром 7,45 мм, а в воде — форму секторов (рис. 10).

В качестве калибровочного спектра нейтронов при измерении спектральных индексов использовался спектр Максвелла с температурой нейтронов $20 \pm 0,5^\circ C$, реализуемый в графитовой тепловой колонне реактора Ф-1, имеющей размер $2 \times 2 \times 2$ м (кадмиевое отношение для дисперсии $1,4 \cdot 10^3$).

После облучения детекторов регистрировалась β -активность образующихся изотопов, причем использовалась стандартная счетная аппаратура с пластмассовым сцинтиллятором толщиной 1 мм. Ошибкой в установке детекторов можно пренебречь, т.к. при регистрации активности детекторы устанавливались в одно и то же место — в центр кристалла. Использовались две идентичные установки (рис. 11), причем на одной из них производился обсчет детекторов, другая служила для регистрации фона, величина которого не превышала 1 имп/сек. Стабильность счетной аппаратуры перед каждым измерением проверялась с помощью стандартного образца ^{233}Th . При обработке результатов измерений учитывались поправки на мертвое время аппаратуры, фон, радиосактивный распад, вес детекторов и т.д.

Результаты измерений спектральных индексов и величин кадмиевых отношений приведены в таблице.

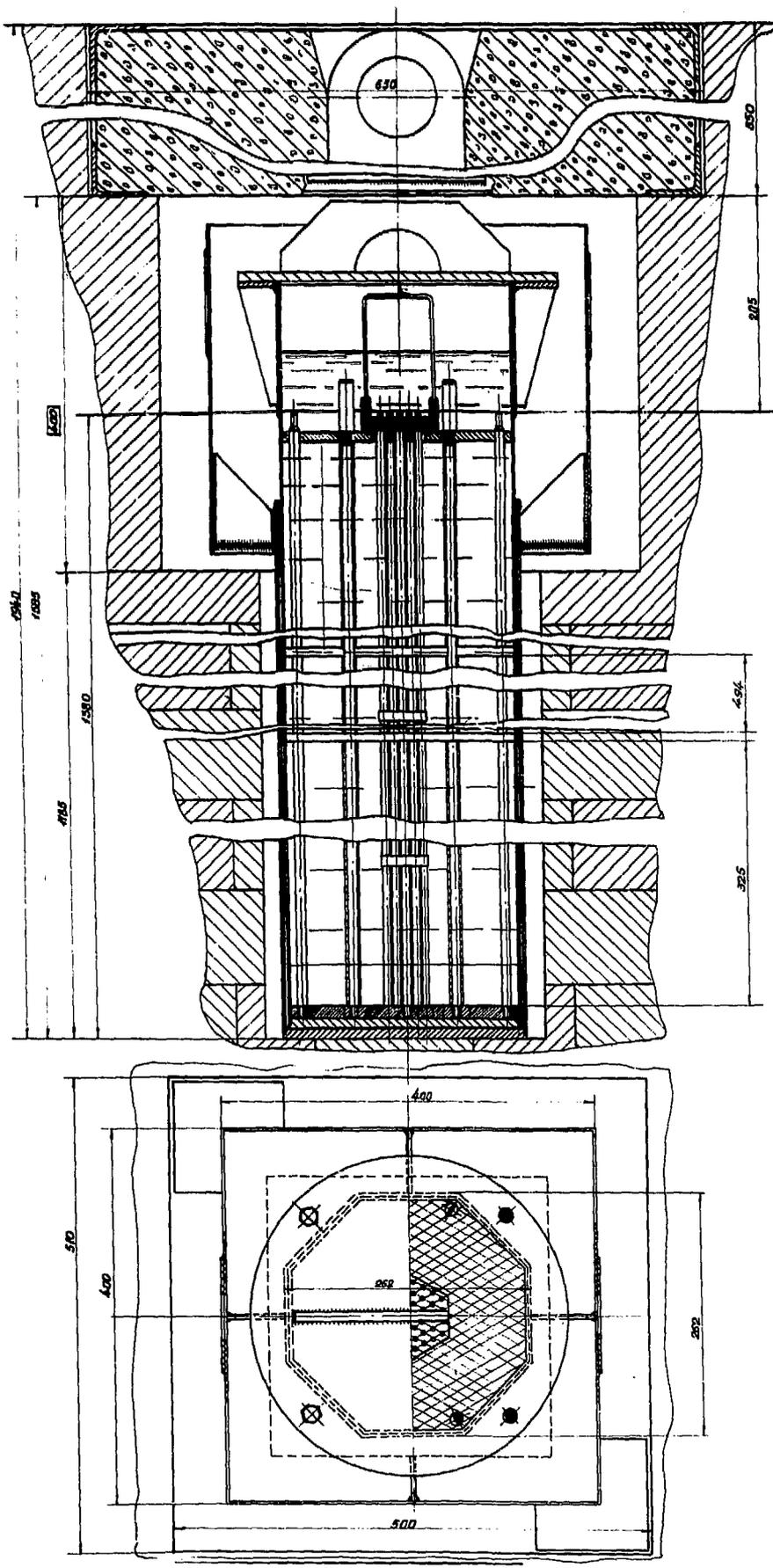
| Место установки детектора | | S_{Dy} | S_{In} | R_{Cd}^{In} | R_{Cd}^{Mn} |
|---------------------------|--|------------------|----------------|---------------|---------------|
| В воде | Центр сборки | $0,78 \pm 0,035$ | $3,3 \pm 0,21$ | $2,0 \pm 0,1$ | $4,3 \pm 0,2$ |
| | Центр сборки, окруженной кадмием | $0,85 \pm 0,07$ | - | - | - |
| | Центр сборки | $0,76 \pm 0,030$ | $3,6 \pm 0,10$ | $2,0 \pm 0,1$ | $4,1 \pm 0,2$ |
| | Центр сборки, окруженной кадмием | $0,73 \pm 0,05$ | $3,4 \pm 0,2$ | - | $4,2 \pm 0,2$ |
| В твэле | Смещен на 12,7 мм от центра сборки в сторону, противоположную оси реактора Ф-1 | $0,76 \pm 0,04$ | $3,2 \pm 0,2$ | - | - |
| | Смещен на 12,7 мм от центра сборки по направлению к оси реактора Ф-1 | $0,74 \pm 0,06$ | $3,3 \pm 0,2$ | - | - |

Величина абсолютного потока тепловых нейтронов оценивалась в центральной области подкритической сборки (на высоте 400 мм от нижней плиты). Сравнивались активности медных фольг при облучении их в исследуемом потоке нейтронов и в известном потоке в центре активной зоны реактора Ф-1, который известен из более ранних экспериментов по активации золота. Измеренная величина потока тепловых нейтронов при экспериментах равна $(1,53 \pm 0,2) \cdot 10^8$ н/см²сек при потоке в центре Ф-1 $(4,97 \pm 0,3) \cdot 10^8$ н/см²сек.

Из анализа распределения величины кадмиевого отношения для изотопов Mn^{55} и In^{115} по высоте подкритической сборки (рис.6) следует, что на расстоянии ~ 9 см от опорной плиты устанавливается постоянная величина кадмиевого отношения. Аналогичная ситуация наблюдается при рассмотрении распределения кадмиевого отношения по радиусу сборки (рис.7а,б). Здесь также имеется небольшая область в центре сборки ($\varnothing 7-8$ см), где наблюдается постоянная величина кадмиевого отношения для тех же элементов. Постоянство величины кадмиевого отношения для Mn сохраняется в этой же области при облучении сборки закадмиевыми нейтронами (рис. 7а,б), причем абсолютная величина в пределах ошибки одинакова как при облучении сборки тепловыми, так и закадмиевыми нейтронами (см. таблицу).

Величины спектрального индекса S_{Dy} , измеренные в центральной области сборки, при облучении ее тепловыми и закадмиевыми нейтронами в пределах экспериментальных ошибок совпадают (см. таблицу). Величины S_{Dy} , S_{In} при перемещении экспериментального твэла на один шаг от центра сборки по различным направлениям также в пределах ошибок совпадают.

Из вышесказанного следует, что исследуемая подкритическая сборка имеет в центре небольшую область с равновесным энергетическим спектром нейтронов и пригодна для измерения нейтронно-физических параметров топливных решеток.



Примечание.
 Шпильки, входящие в диаметр сборки,
 проверить на герметичность наливом
 воды.

Рис. 1.

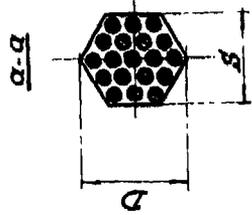
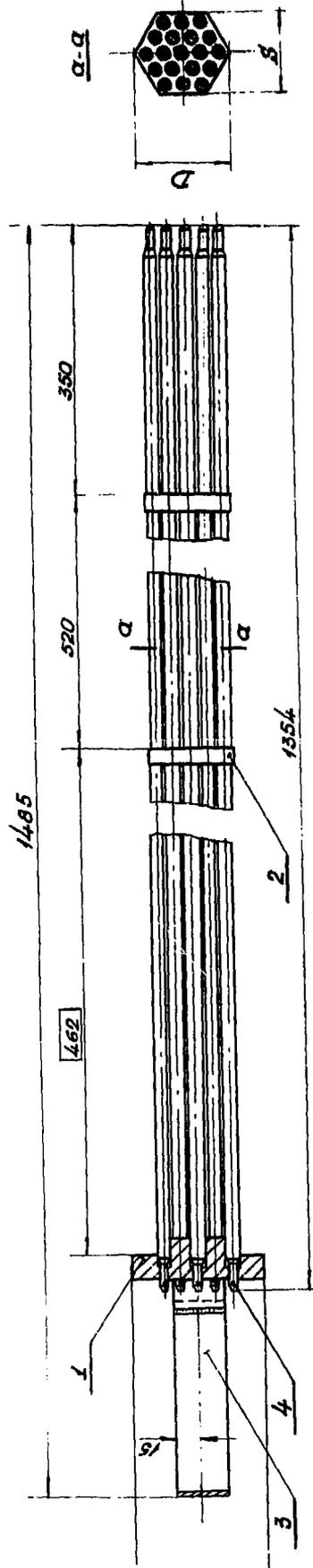


FIG. 2.

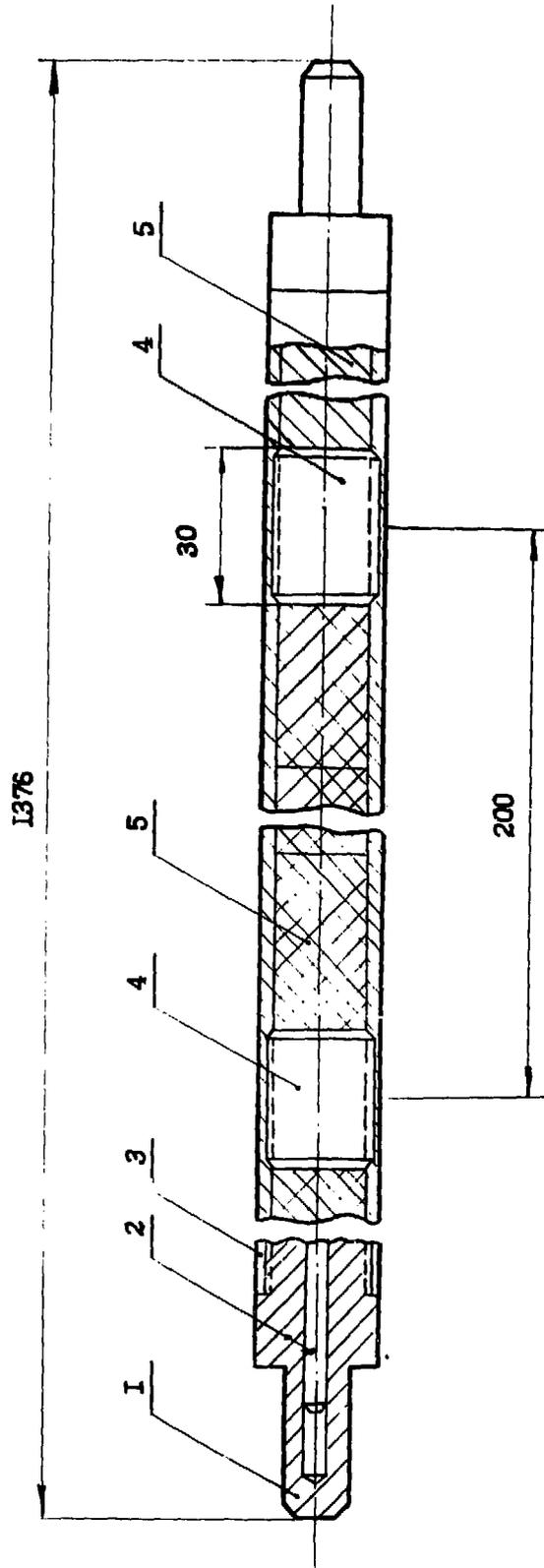


Рис. 3. Разборный газ.

1 - хвостовик; 2 - стальная пробка; 3 - оболочка;
4 - блочки из двухкис урана; 5 - алюминиевая пробка.

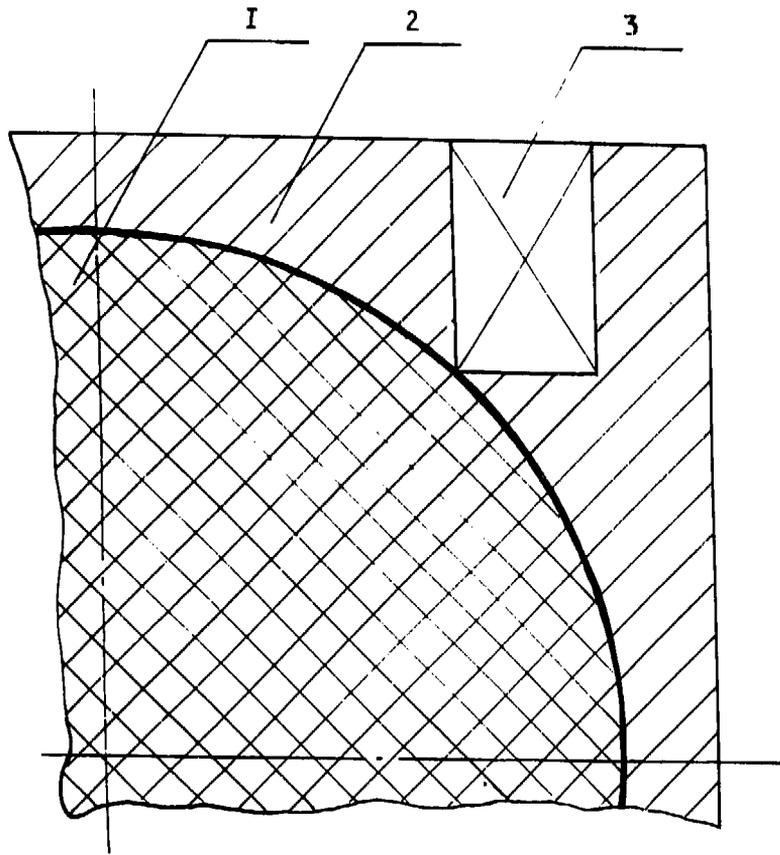


Рис. 4. Схема расположения подкритической сборки в отражателе реактора Ф-1.
 1 - активная зона Ф-1; 2 - подкритическая сборка; 3 - отражатель.

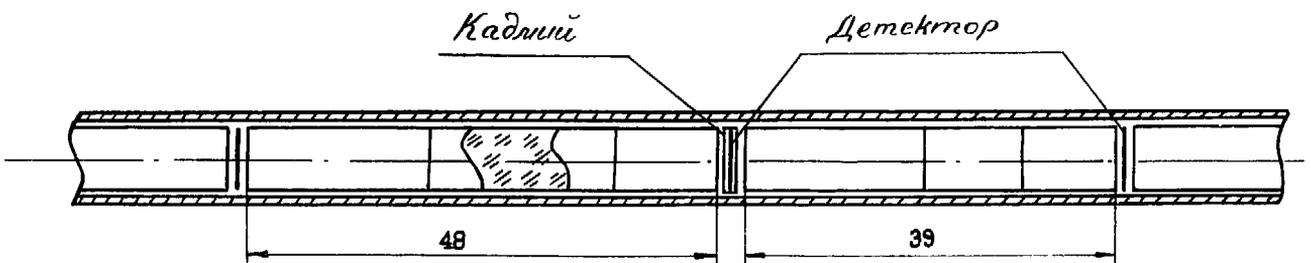


Рис. 5. Схема расстановки детекторов при измерении распределения потока нейтронов и кадмиевого отношения по высоте подкритической сборки.

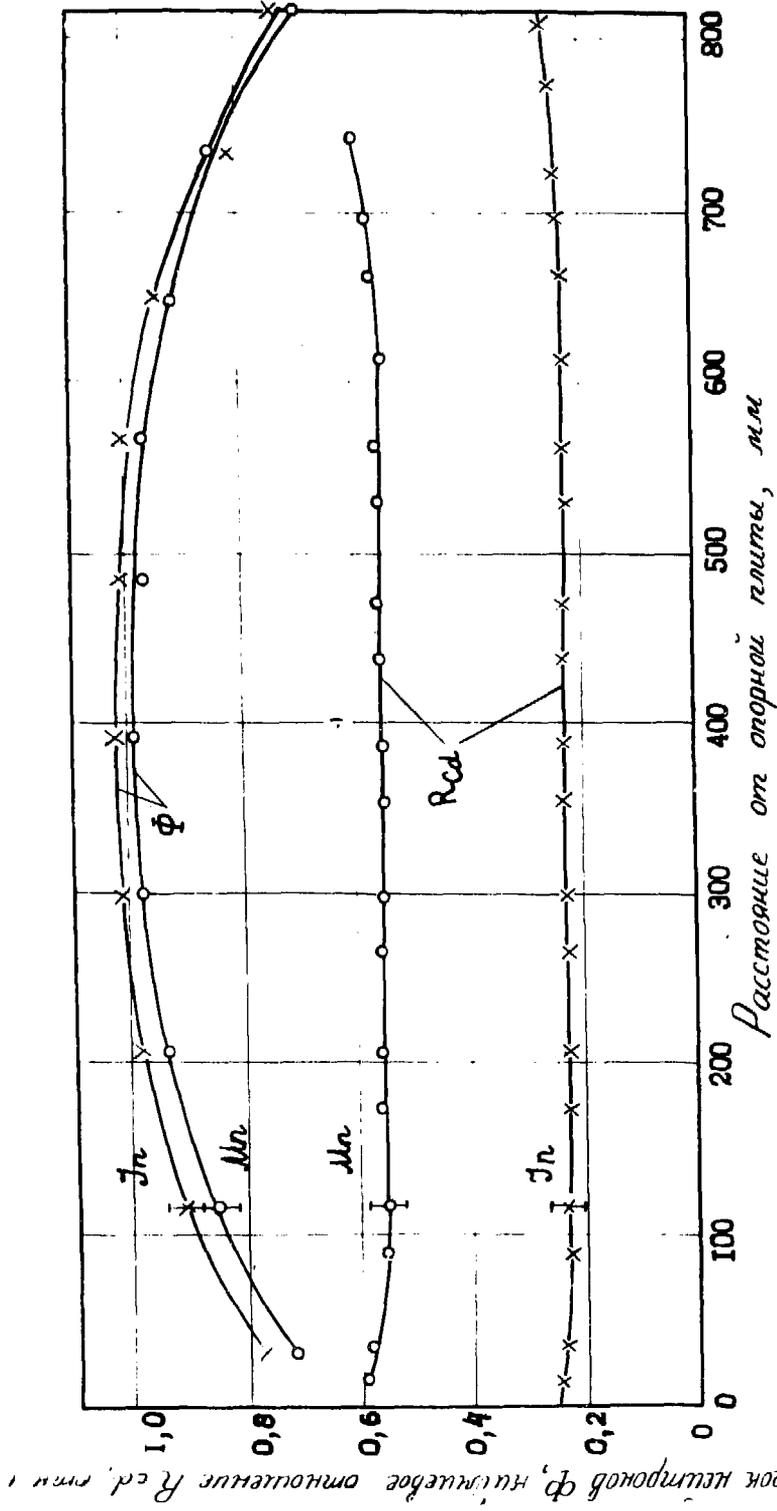


Рис. 6. Распределение потока нейтронов и кадмиевого отношения.

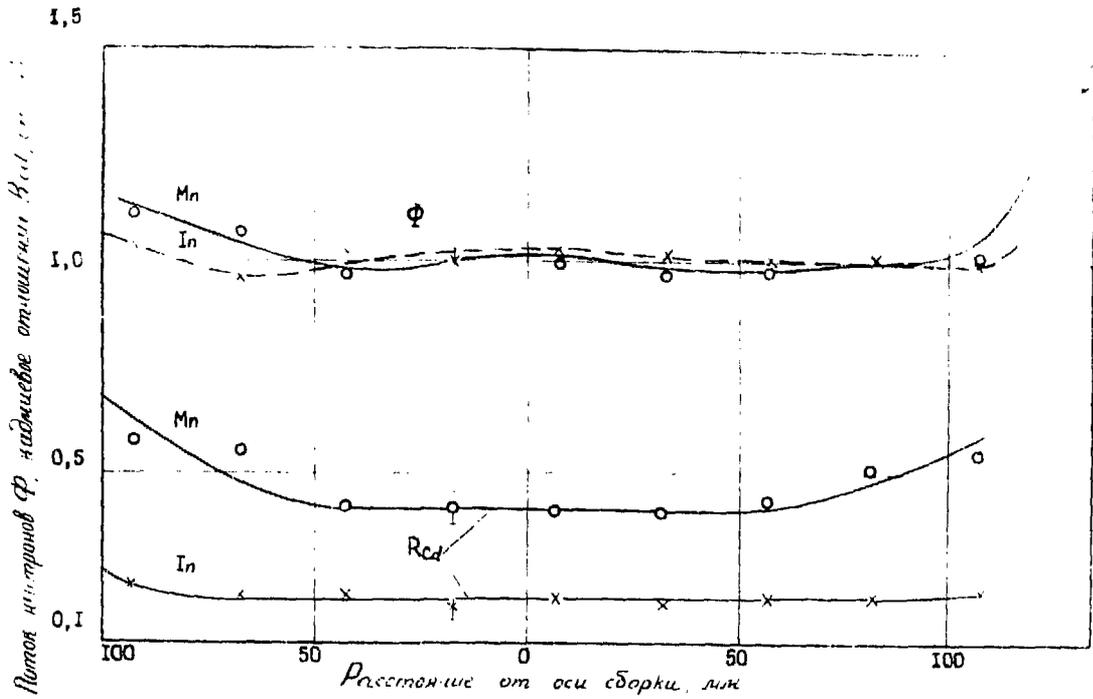


Рис. 7а. Распределение потока нейтронов и кадмиевого отношения по радиусу сборки

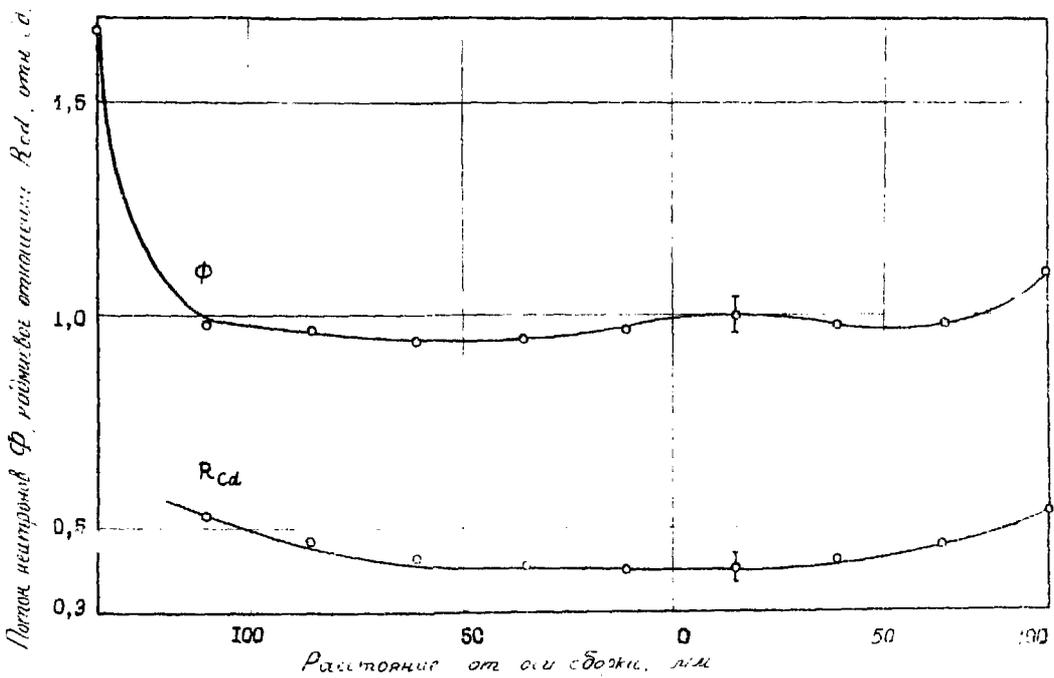


Рис. 7б. Распределение потока нейтронов и кадмиевого отношения по радиусу сборки в кадмиевом чехле.

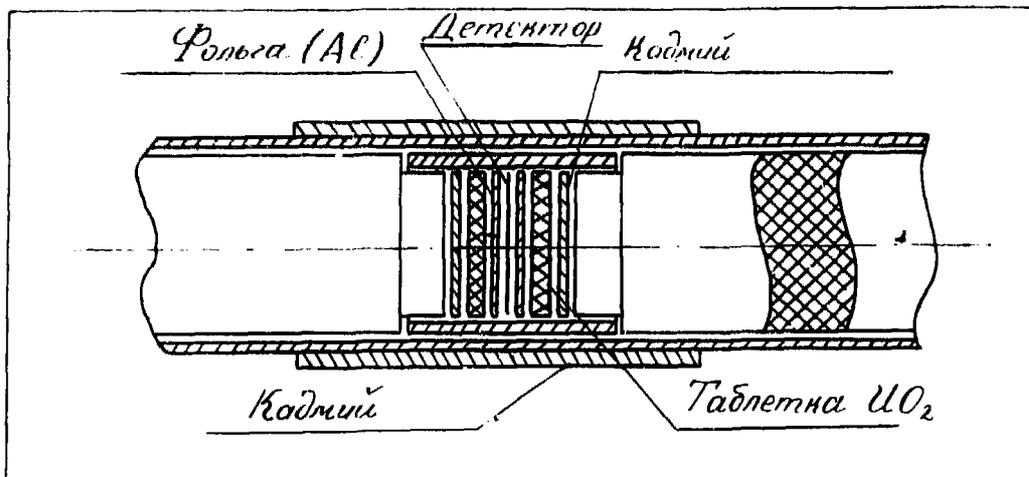


Рис. 8. Расположение детекторов в твэле при измерении кадмиевого отклонения.

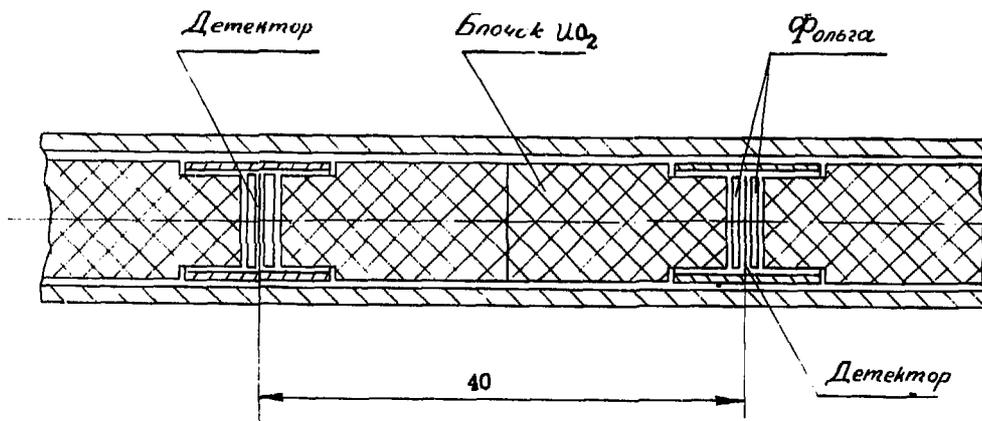


Рис. 9. Расположение детекторов в твэле при измерении спектральных индексов.

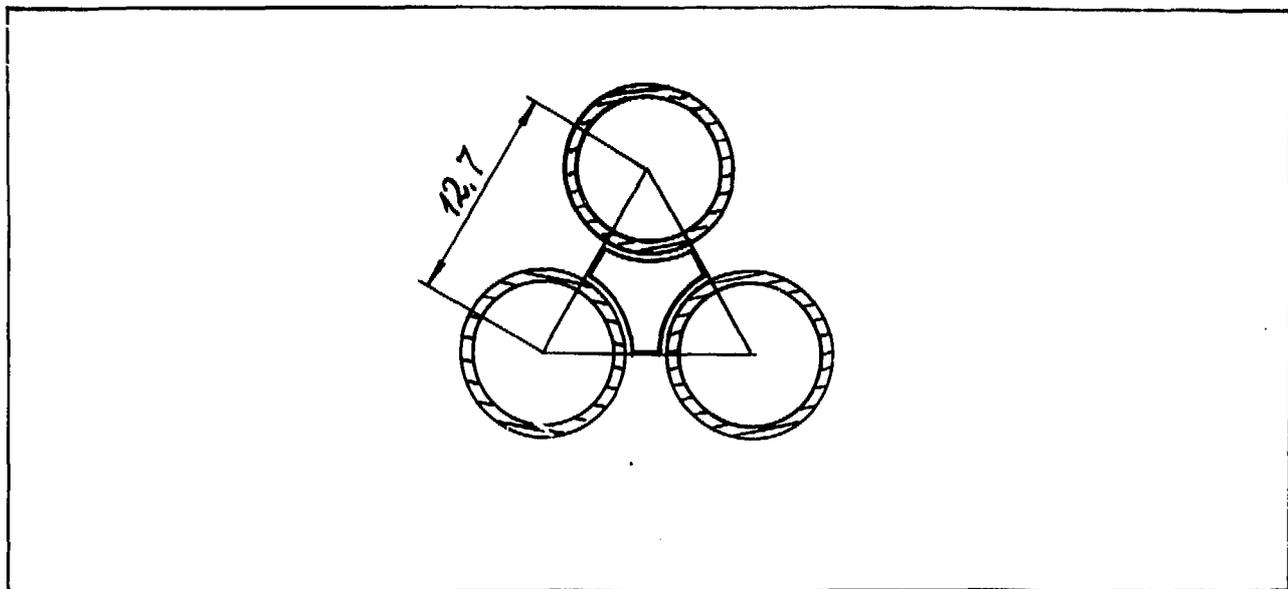


Рис. 10. Сектора из фольг для измерения средней плотности нейтронов в воде.

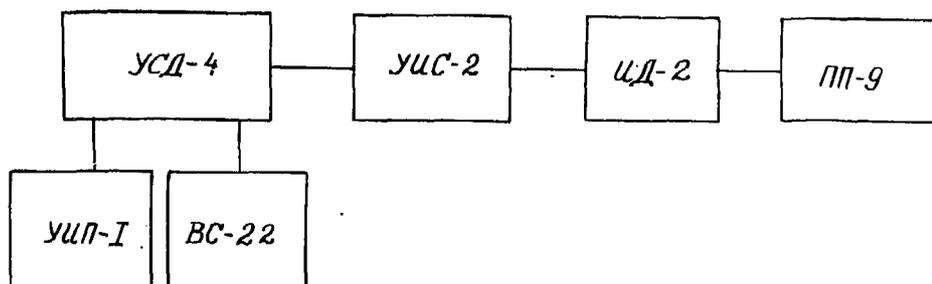


Рис. 11. Блок-схема установок для измерения активности индикаторов.
 УСД-4 - сцинтилляционный датчик с пластмассовым кристаллом;
 УСД-2 - спектрометрический усилитель;
 ИД-2 - дискриминатор;
 ПП-9 - пересчетный прибор;
 УИП-1 и ВС-22 - источники питания.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Вейнберг А., Вигнер Е. Физическая теория ядерных реакторов. Перевод с англ., ИЛ, М., 1961.
2. Беркурц К, Виртц К. Нейтронная физика. Перевод с англ., Атомиздат, М., 1968.
3. Klein N. R. *Proceedings Physical sciences, series B*, VLXIX, No 4p.111 (1966).



Техн. редактор Н.И.Мазаева
Корректор В.П.Горячева
Т-03479.8.02.72г.Формат 60x90 1/8.
Уч.-изд.л.1,57.Тир.200 экз.Зак.10003.
ОНТИ. ИАЭ.