



Ордена Ленина и ордена Октябрьской Революции

Институт атомной энергии

им. И. В. Курчатова

А.С. Каминский, С.В. Лобода,

ИАЭ-3492/4

А.Д. Молодцов, В.А. Никифоров,

Е.С. Субботин, Л.Я. Тихонов

**ИССЛЕДОВАНИЕ НА КРИТИЧЕСКОЙ СБОРКЕ
ХАРАКТЕРИСТИК РЕАКТОРА
ДЛЯ ЛАБОРАТОРИИ НЕЙТРОННОЙ РАДИОГРАФИИ**

Москва 1981

УДК 621.039.51

Ключевые слова: реактор, критическая сборка, нейтронно-физические характеристики, реактивность, плотность потока нейтронов, пучок нейтронов, эксперимент, расчет, радиография.

Представлены результаты исследований нейтронно-физических характеристик специализированного реактора для лаборатории нейтронной радиографии на прототипной критической сборке. Основными задачами исследований, результаты которых изложены в данной работе, являлись:

- определение параметров ядерно-безопасной эксплуатации пучкового реактора растворного типа;
- изучение условий формирования пучков нейтронов в отражателе и определение их параметров;
- апробация методик расчета некоторых характеристик по экспериментальным данным.

Эксперименты проводились на критсборке с графитовым и графито-бериллиевым отражателем.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из методов неразрушающего контроля изделий является метод нейтронной дефектоскопии и его разновидность — нейтронная радиография [1]. Этот метод сулит значительный экономический эффект при его внедрении в практику заводских лабораторий.

Важным этапом применения метода нейтронной радиографии является изучение возможностей и условий использования различного типа источников тепловых нейтронов.

Для получения нейтронных радиограмм высокого качества за несколько минут экспозиции требуется плотность потока тепловых нейтронов $\sim 10^7$ н/(см².с) на выходе коллиматора при отношении его длины к исходному диаметру 30:1 [2]. Лучшим источником нейтронов является реактор, работающий на мощности в несколько десятков киловатт и обеспечивающий многоместный контроль объектов [3]. Использование реакторной установки в производственных условиях выдвигает требование к простоте и надежности ее конструкции, высокой степени безопасности при эксплуатации, низкой стоимости и др. Наиболее полно перечисленным требованиям отвечает пучковый реактор растворного типа с отражателем. Основной физической задачей при создании такого реактора является достижение возможно большего отношения плотности потока тепловых нейтронов к тепловой мощности аппарата, так называемого "качества" реактора.

Настоящая работа посвящена исследованию реактора для лаборатории нейтронной радиографии на критической сборке, моделирующей экспериментальный образец растворного реактора "Аргус". Основными направлениями исследований являлись:

— определение параметров, характеризующих ядерно-безопасную эксплуатацию;

- изучение условий формирования пучков нейтронов, определение их физических характеристик и оценка влияния элементов конструкции на нейтронно-физические характеристики системы;
- апробация методик расчета некоторых физических параметров по экспериментальным данным.

2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ СБОРКИ

Критическая сборка предназначена для исследования нейтронно-физических характеристик пучковых реакторов растворного типа и в первую очередь экспериментального образца реактора "Аргус" для лаборатории нейтронной радиографии. Поэтому конструкция критсборки воспроизводила все основные системы и узлы этого реактора. В качестве топлива использовался водный раствор уранил-сульфата с обогащением 90% по урану-235 и с рН-1. Раствор заливался в корпус критсборки, который представлял собой цилиндрический сосуд из нержавеющей стали с внутренним диаметром 305 мм, дно которого имело вид полусферы радиусом 152,5 мм. Высота цилиндрической части составляла 589,5 мм. Корпус был выполнен в двух модификациях с толщиной стенки 3 мм и 5 мм соответственно. В полости корпуса располагались центральный экспериментальный канал и два канала под стержни аварийной защиты, каждый из которых был выполнен в виде двух коаксиальных цилиндров из нержавеющей стали диаметрами 48x2 мм и 40x1 мм соответственно. Двухмиллиметровый кольцевой зазор (технологический зазор) между внешним и внутренним цилиндрами был заполнен водой и моделировал технологический зазор каналов реактора. По периферии внутри корпуса проходил трубчатый змеевик из нержавеющей стали диаметром 10x2 мм и длиной 14 000 мм, заполненный водой и моделирующий охлаждение реактора.

Отражатель имел форму призмы с габаритными размерами 1300x1300x1200 мм. Изучались отражатели: графитовый, собранный из блоков различных размеров, бериллий-графитовый (комбинированный), центральная часть которого (вставка) внешним диаметром 488 мм и высотой 800 мм была выполнена из бериллия (толщина вставки 82 мм, пористость по газу 26%). Конструктивно отражатель обеспечивал реализацию в нем двух тангенциальных относительно

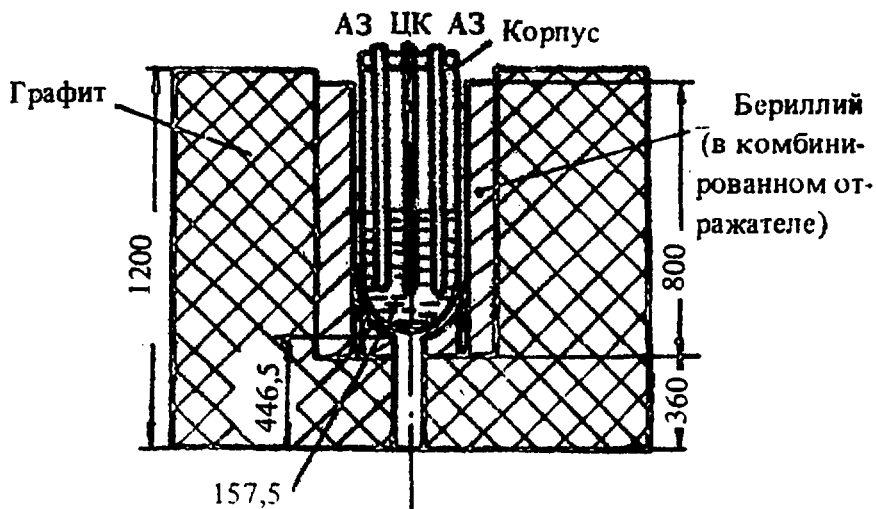
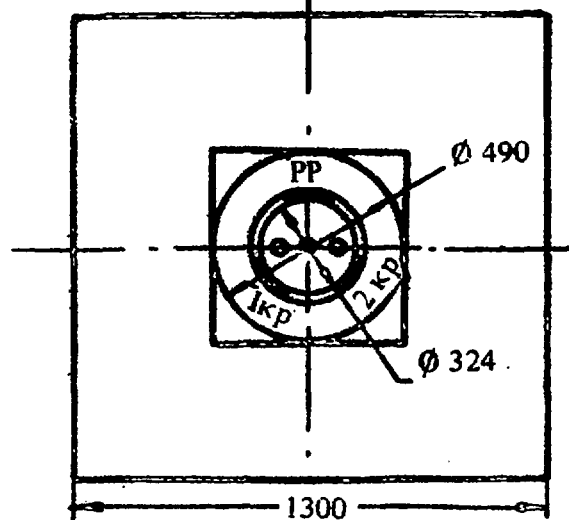


Рис. 1. Схема критической сборки



активной зоны конусообразных каналов с начальным диаметром 60 мм и диаметрами на выходе из отражателя 180 мм и 80 мм соответственно.

Для компенсации реактивности и регулирования мощности применялись 3 плоских поглощающих стержня, расположенных в специальных зазорах. Имелась возможность изменения ширины стержней и типа поглотителя (B_4C и Cd) при изучении способов компенсации требуемой реактивности.

Схематично конструкция критической сборки показана на рис. 1.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭФФЕКТОВ РЕАКТИВНОСТИ

3.1. Зависимость критической массы от концентрации урана в растворе и температурный эффект реактивности

Известно, что зависимость критической массы от концентрации урана в растворе имеет минимум при данной конструкции аппарата. Из этого следует, что при любом изменении концентрации раствора, соответствующей минимуму критмассы (в том числе при испарении или добавлении воды), эффективный коэффициент размножения нейтронов уменьшается. Это обстоятельство играет важную роль для обеспечения безопасных условий эксплуатации установки. Измерения зависимости критмассы от концентрации проводились на критической сборке как с графитовым, так и с комбинированным отражателем в диапазоне концентраций раствора 44,8 – 110 г/л по урану. Достижение критического состояния осуществлялось заливом в сборку раствора объемом V , несколько превышающим критический. Затем измерялись запас реактивности ρ и зависимость реактивности системы от объема вблизи критического состояния. Значения $\partial\rho/\partial V$ оценивались путем измерения отрицательной реактивности при сливе малых порций раствора. Измерения производились с помощью аналогового измерителя реактивности ПИР-2М, который реализует решение шестигрупповых уравнений кинетики реактора в точечном приближении. Погрешность отдельного измерения реактивности не превосходила 3% [4]. По полученным данным были вычислены критический объем и критическая масса M при фиксированных концентрациях C . Результаты определения $\partial\rho/\partial V = f(C_i)$ и $M = f(C_i)$ показаны на рис. 2 и 3 соответственно. Зависимости для обоих типов отражателей подобны, причем: минимум критмассы достигается при концентрации урана в растворе 72 г/л. При комбинированном отражателе величина критмассы примерно на 10% меньше по сравнению с графитовым отражателем практически во всем диапазоне рассмотренных концентраций. Из результатов видно, что изменение критической массы в диапазоне концентрации 69 – 80 г/л не превосходит 2%, поэтому в этом диапазоне и целесообразно выбирать рабочую концентрацию раствора для реактора.

Положительным фактором, с точки зрения ядерной безопасности, в

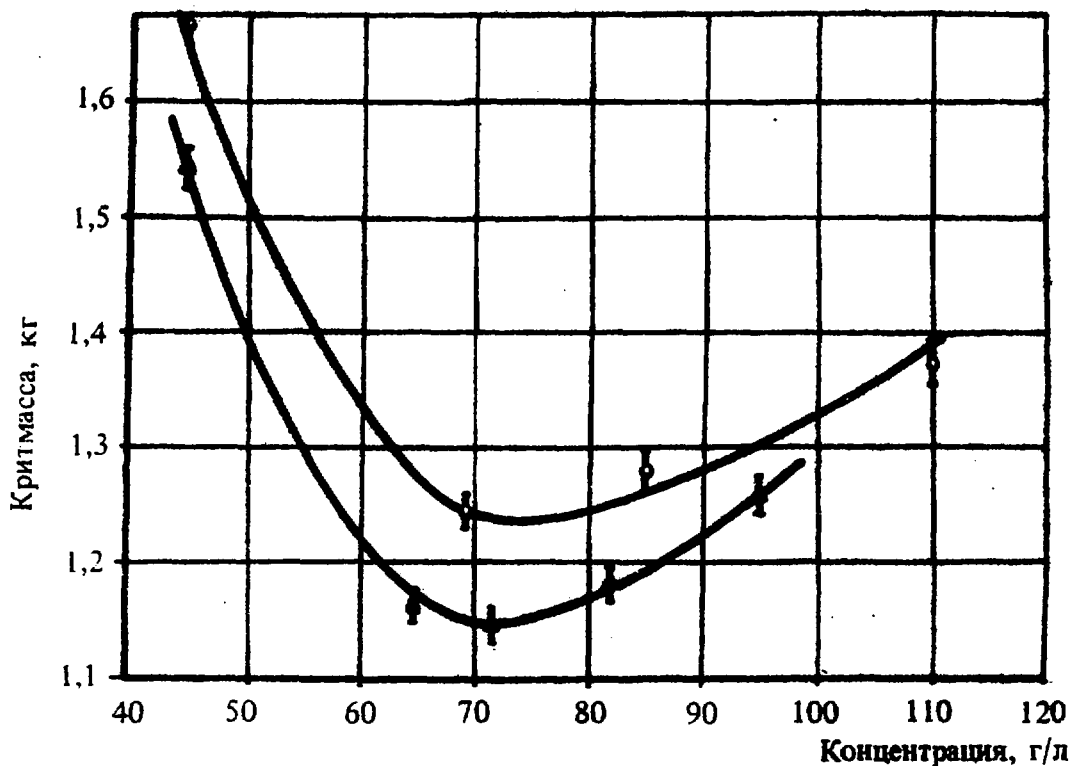


Рис. 2. Зависимость критмассы от концентрации урана в растворе: \circ – графитовый отражатель; \blacktriangle – комбинированный отражатель

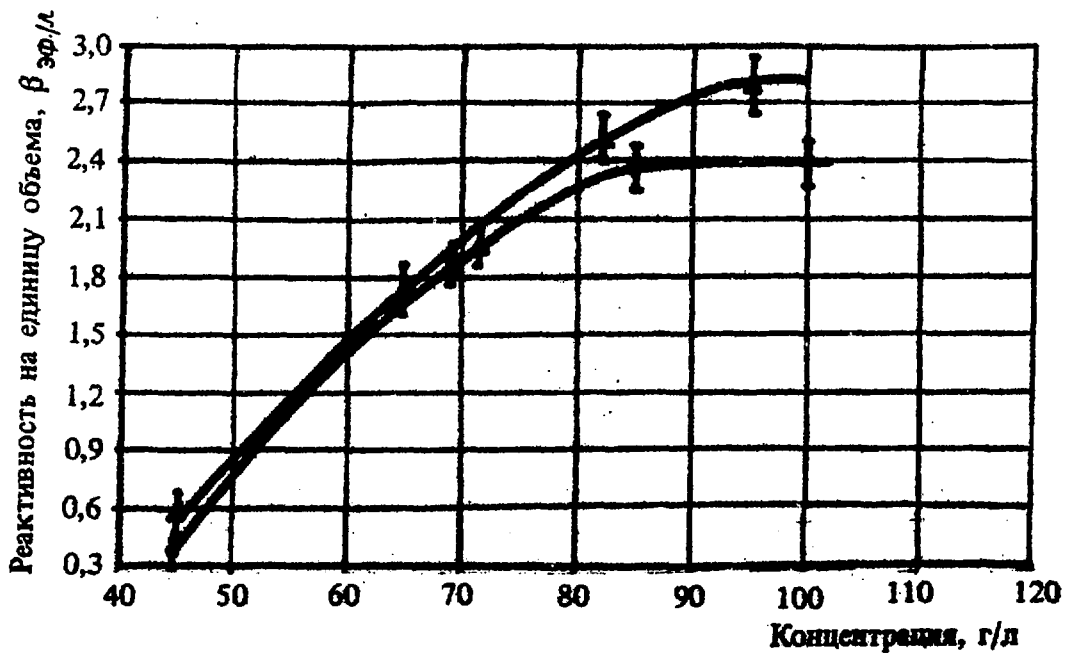


Рис. 3. Зависимость $\beta_{эф.}/\partial V$ от концентрации урана в растворе: \circ – графитовый отражатель; \blacktriangle – комбинированный отражатель

аппаратах изучаемого типа является отрицательный температурный коэффициент реактивности. Ожидается, что при рабочих уровнях мощности реактора разогрев раствора и других компонентов будет составлять $80 - 90^{\circ}\text{C}$, что приведет к появлению в системе отрицательной избыточной реактивности. Наличие такого эффекта обуславливает необходимость компенсации этого эффекта при выводе реактора на мощность и накладывает определенные требования на физический вес регуляторов. Для оценки температурного эффекта реактивности был подготовлен и проведен специальный эксперимент на критической сборке. Путем прокачки горячей воды по змеевику и технологическим зазорам центрального канала и каналов АЗ активная зона разогревалась до температуры 88°C . После отключения прокачки с помощью прибора ПИР-2М измерялась реактивность при остывании раствора с непрерывной записью ее значения на диаграммную ленту. По достижении величины положительной реактивности $\sim 0,3 \beta_{\text{эф}}$ она компенсировалась сливом части раствора с записью значений вводимой при этом отрицательной реактивности на ту же диаграммную ленту. Измерение температуры раствора осуществлялось с помощью двух хромель-копелевых термопар, одна из которых располагалась в центре, а другая на периферии активной зоны. Показания термопар были выведены на диаграмму. Различие показаний по двум термопарам не превышало 2%, и это значение было принято в качестве оценки погрешности измерения температуры. Поскольку при определении самого эффекта бралась разность температур, то возможная систематическая ошибка не учитывалась. Результаты измерений представлены на рис. 4. Суммарная величина эффекта при изменении температуры в диапазоне $22 - 88^{\circ}\text{C}$ составила $(2,97 + 0,15) \beta_{\text{эф}}$. Зависимость реактивности от температуры имеет линейный (в пределах погрешности) характер с наклоном $0,045 \beta_{\text{эф}} / ^{\circ}\text{C}$.

3.2. Эффективность поглощающих стержней и влияние некоторых параметров на реактивность

Еще одним вопросом, имеющим практическое значение для обеспечения безопасных условий работы, является исследование компенсирующей способности рабочих органов СУЗ. В качестве регуляторов рассматривались плоские поглощающие стержни из карбида бора и кадмия, расположенные в специальных зазорах между корпусом и

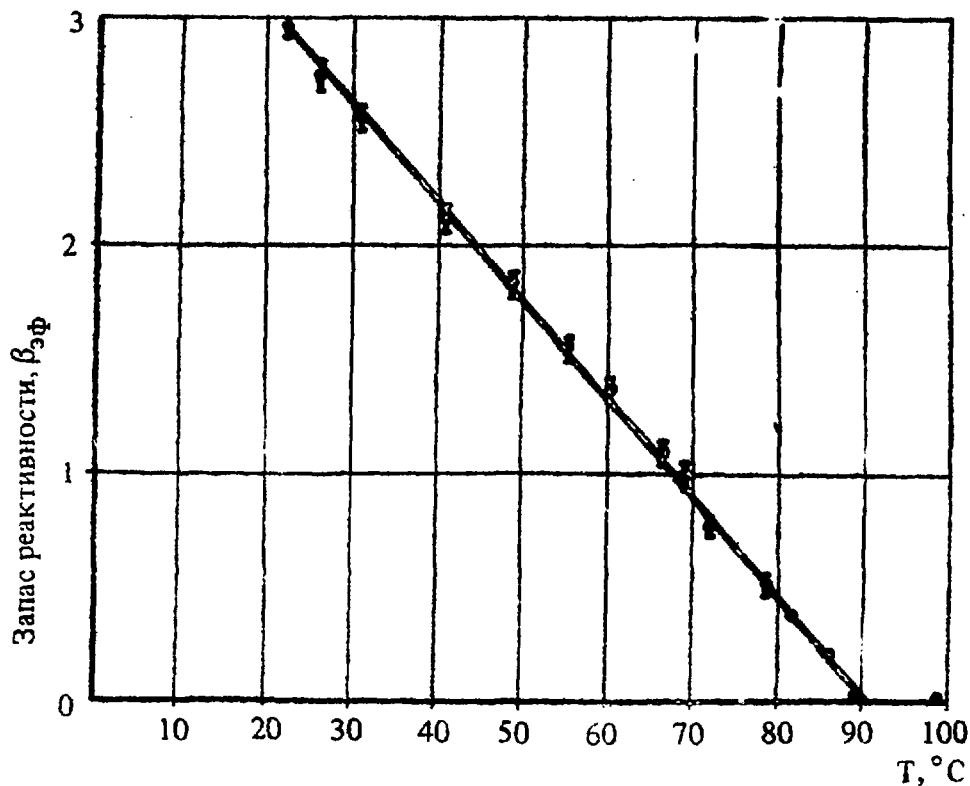


Рис. 4. Температурный эффект реактивности (графитовый отражатель)

отражателем. Поглощающие стержни реактора, работающего на номинальном уровне мощности, должны обеспечивать компенсацию температурного и мощностного эффектов реактивности (прогнозируемая величина последнего составляет $\sim 0,3 \beta_{эф}$ при мощности 20 кВт) и приведение аппарата в безопасное состояние. Измерялась эффективность регуляторов с разной шириной поглощающего слоя, результаты даны в табл. 1.

Таблица 1

Эффективность поглощающих стержней

Состояние критсборки	Ширина поглощающего слоя, мм	Поглотитель	Эффективность, $\beta_{эф}$
1	2	3	4
Отражатель графитовый $V=18,5л$;	40	B_4C	$0,85 \pm 0,04$
	80	B_4C	$1,30 \pm 0,06$

Продолжение табл. 1

1	2	3	4
$c = 71,3$ г/л	250	Cd (1,0 мм) B ₄ C	$0,68 \pm 0,03$ $3,15 \pm 0,16$
Отражатель комбинированный	80	Cd (1,0 мм)	$0,50 \pm 0,02$
$V = 16,7$ л; $c = 71,6$ г/л	250	Cd (0,5 мм)	$1,45 \pm 0,07$

На рис. 5 приведены регулировочные характеристики стержней с борным поглощающим слоем шириной 250 мм и 40 мм и кадмиевым шириной 250 мм. Изменения объема раствора в пределах ~ 2 л и соответствующей высоты раствора в пределах ~ 30 мм слабо сказываются на эффективности регуляторов. Уменьшение физического веса при переходе на кадмий связано с тем, что спектр нейтронов в месте расположения стержней отличается от теплового. Характерной особенностью регулировочных характеристик является незначительное изменение эффективности стержней при их перемещении над раствором и, наоборот, сильная зависимость от степени погружения вблизи нижнего положения (отметка 0). Из этого следует, что увеличение хода стержня ниже активной зоны может привести к существенному возрастанию его эффективности.

В случае использования борных стержней с шириной 250 мм их суммарная эффективность (включая стержень ручного регулирования шириной 40 мм) составляет около $7 \beta_{\text{эф}}$. Компенсирующая способность регуляторов специализированного реактора с учетом температурного ($\sim 3 \beta_{\text{эф}}$) и мощностного ($0,3 \beta_{\text{эф}}$) эффектов, запаса реактивности на экспериментальные цели и камганию ($0,7 \beta_{\text{эф}}$ и $1 \beta_{\text{эф}}$ соответственно) и обеспечение подкритичности ($\sim 1,3 \beta_{\text{эф}}$) должна равняться не менее $6,3 \beta_{\text{эф}}$. Из-за возможных изменений конструкции реактора (по сравнению с моделью) в процессе проектирования, технологических отклонений, неточности измерений и т.п. целесообразно было рассмотреть вопрос увеличения эффективности регуляторов. Кроме увеличения их хода ниже активной зоны, было рассмотрено предположение, что увеличение эффективности стержней можно достичь, если при их извлечении освобождающийся объем заполняется водородосодержащим

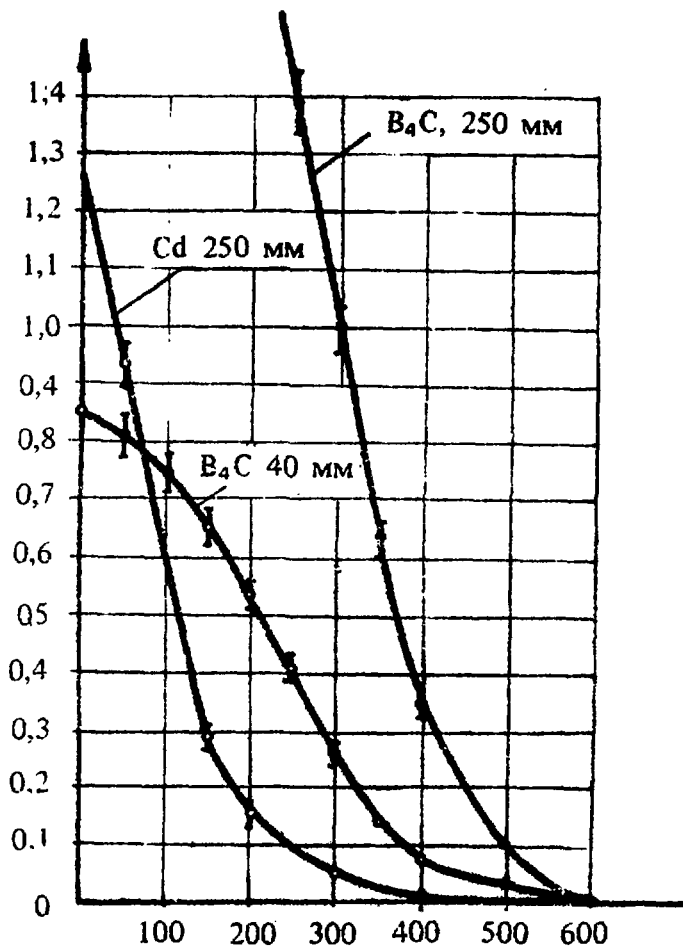


Рис. 5. Регулировочные характеристики поглощающих стержней

замедлителем. Экспериментальная проверка на сборке не подвергала это предположение. Одним из способов обеспечения требуемой эффективности было бы размещение цилиндрического борного стержня в центральном канале (аналогичного стержням АЗ), где его эффективность составляет $\sim 4 \beta_{\text{эф}}$. Но при таком решении теряется экспериментальная полость и снижается универсальность аппарата. Из-за большой доли надтепловых нейтронов на границе активной зоны и отражателя увеличение эффективности стержней возможно при использовании борного поглотителя большей по сравнению с порошкообразной плотностью или обогащенного по изотопу бор-10, или поглотителей типа самарий. Окончательно вопрос о способе компенсации может быть решен после исследований на экспериментальном

образце реактора. Были проведены также эксперименты по определению эффектов реактивности, связанных с изменением некоторых параметров критсборки. В частности, измерен эффект реактивности при изменении толщины стального корпуса от 3 до 5 мм и оценено влияние на реактивность реализации в отражателе двух тангенциальных каналов с кадмиевыми коллиматорами. Знание этих эффектов имеет практическую ценность при выборе загрузки, определении $\beta_{эф}$ разрабатываемого реактора и эффективности рабочих органов СУЗ. Также определено влияние воды в змеевике на реактивность и эффект залива водой центрального канала (в последнем случае вода моделировалась оргстеклом). Все это позволяет проанализировать состояние аппарата при неисправностях в его технологических системах и выбрать меры по ликвидации неисправностей такого рода. Эффект $\Delta \rho$ определялся по разности запасов реактивности ρ_1 и ρ_2 соответствующих состояний сборки. Для удобства результаты измерений сведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Результаты дополнительных измерений реактивности

Операция	$\rho_1, \beta_{эф}$	$\rho_2, \beta_{эф}$	$\Delta \rho = \rho_2 - \rho_1$
Замена корпуса толщиной 3 мм на корпус толщиной 5 мм	$1,39 \pm 0,07$	$0,47 \pm 0,02$	$-(0,92 \pm 0,07)$
Реализация в отражателе тангенциальных каналов	$0,79 \pm 0,04$	$0,63 \pm 0,03$	$-(0,16 \pm 0,03)$
Эффект воды в технологических трассах (вода есть, воды нет в змеевике и технологических лазорах)	$1,63 \pm 0,08$	$1,195 \pm 0,060$	$-(0,44 \pm 0,10)$
Заполнение водой ЦК	$0,0605 \pm 0,030$	$0,675 \pm 0,030$	$-(0,02 \pm 0,04)$

Реализация каналов в отражателе не приводит к сколько-нибудь существенному изменению реактивности и не требует принятия дополнительных мер (например, увеличения загрузки). Более сильно

влияет изменение толщины корпуса. При увеличении прочности корпуса (а следовательно, и надежности) довольно сильно падает запас реактивности.

Рассмотренные отказы в технологических трактах не приводят к значительным эффектам реактивности, и последствия этих неисправностей (в смысле ядерной безопасности) ликвидируются рабочими органами СУЗ.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКОВ НЕЙТРОНОВ

4.1. Пространственное распределение тепловых нейтронов

Для обоснования выбора места выводов пучков нейтронов и исследования параметров самих пучков проводились измерения распределения плотностей потоков нейтронов по графитовому и комбинированному отражателям и в самих пучках. Измерение распределения плотности потока тепловых нейтронов осуществлялось активационным методом с помощью диспрозиевых и медных детекторов. Использовались диспрозиевые фольги диаметром 12 мм, толщиной 250 мг/см^2 и медная проволока диаметром 1 мм. Конструкция отражателя не позволяла проводить измерения с диспрозиевыми фольгами непосредственно от корпуса критсборки, а применение проволоки устраняло этот недостаток. Активность, наведенная тепловыми нейтронами в результате реакций $\text{Dy}^{164}(n, \gamma) \text{Dy}^{165}$ и $\text{Cu}^{63}(n, \gamma) \text{Cu}^{64}$, определялась по известному методу кадмиевой разности [5]. Для диспрозиевых детекторов с оптической толщиной $\mu d \approx 1$ существует неопределенность в оценке значения кадмиевой поправки F_{Cd} , но при кадмиевом отношении $R_{\text{Cd}} = 50 \div 100$ (что было получено в экспериментах) эта неопределенность слабо влияет на конечные результаты. Общая ошибка измерения относительной плотности потока тепловых нейтронов, включая неопределенность в вычислении F_{Cd} , погрешность воспроизводимости положения детекторов, статистическую ошибку и др., составила 5,8% при доверительной вероятности 95%. Измерения по радиусу проводились на высоте 55 см от нижнего торца сборки, а по высоте — на расстоянии 21,75 см от оси, хотя в отдельных экс-

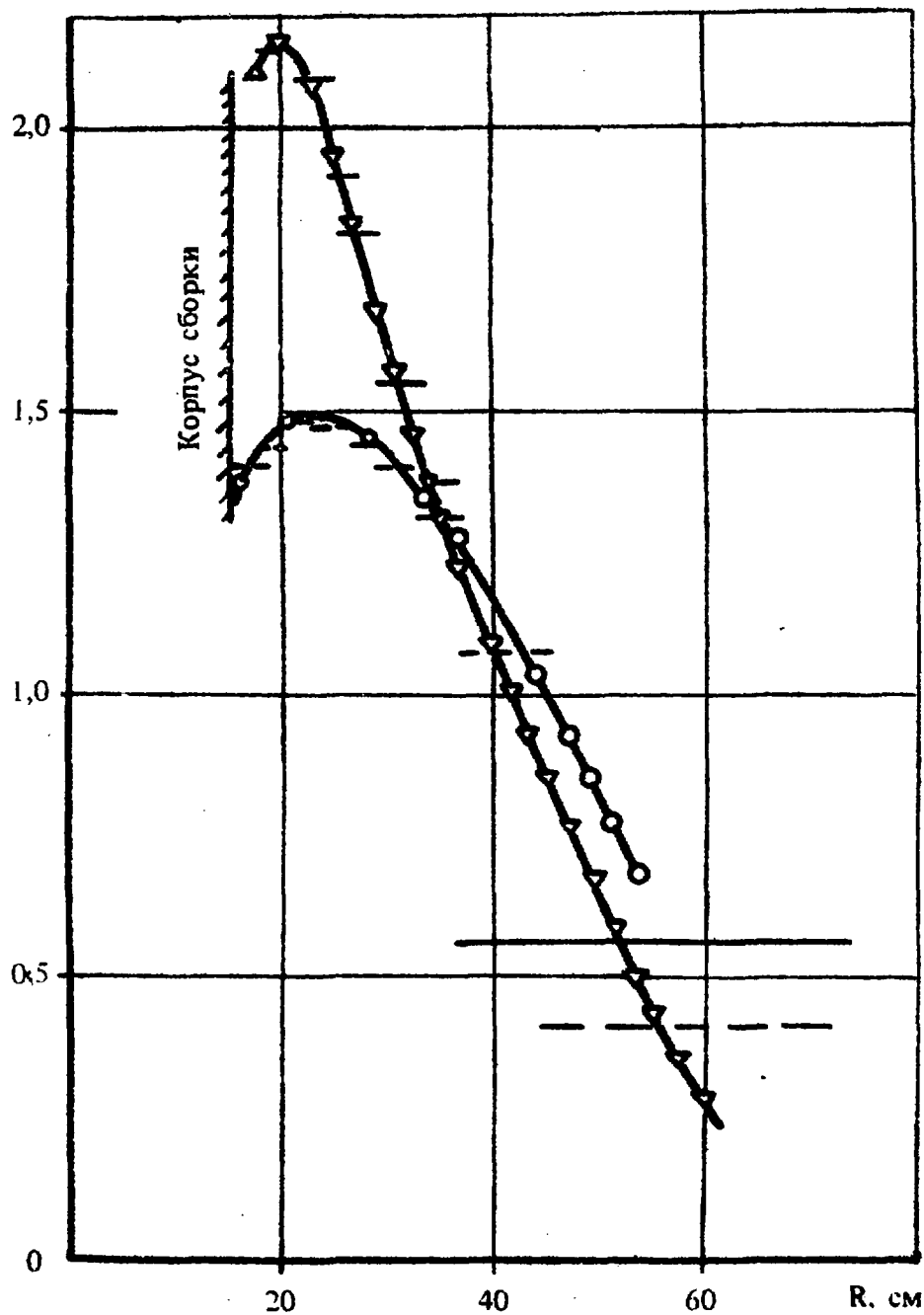


Рис. 6. Относительное радиальное распределение плотности потока тепловых нейтронов в отражателях:

- | | | | | |
|-----|----|-------------|---|-----------------|
| ○ | -- | эксперимент | } | графитовом |
| --- | -- | расчет | | |
| △ | -- | эксперимент | } | комбинированном |
| — | -- | расчет | | |

периментах измерения осуществлялись и на других расстояниях (высотах). Результаты измерений радиального и высотного распределения представлены на рис. 6 и 7 соответственно. Все данные приведены относительно среднего значения потока по соответствующему направлению. Распределения, измеренные в разных секторах отражателя, одинаковы в пределах ошибки измерения.

Максимум радиального распределения для графитового отражателя расположен на расстоянии 23 см от оси сборки, а для комбинированного — на расстоянии 20 см (4 – 5 см от корпуса) и является более острым. Плотность потока тепловых нейтронов в максимуме распределения по комбинированному отражателю на $\sim 40\%$ выше, чем для графитового, а с расстояния ~ 35 см от оси оба рас-

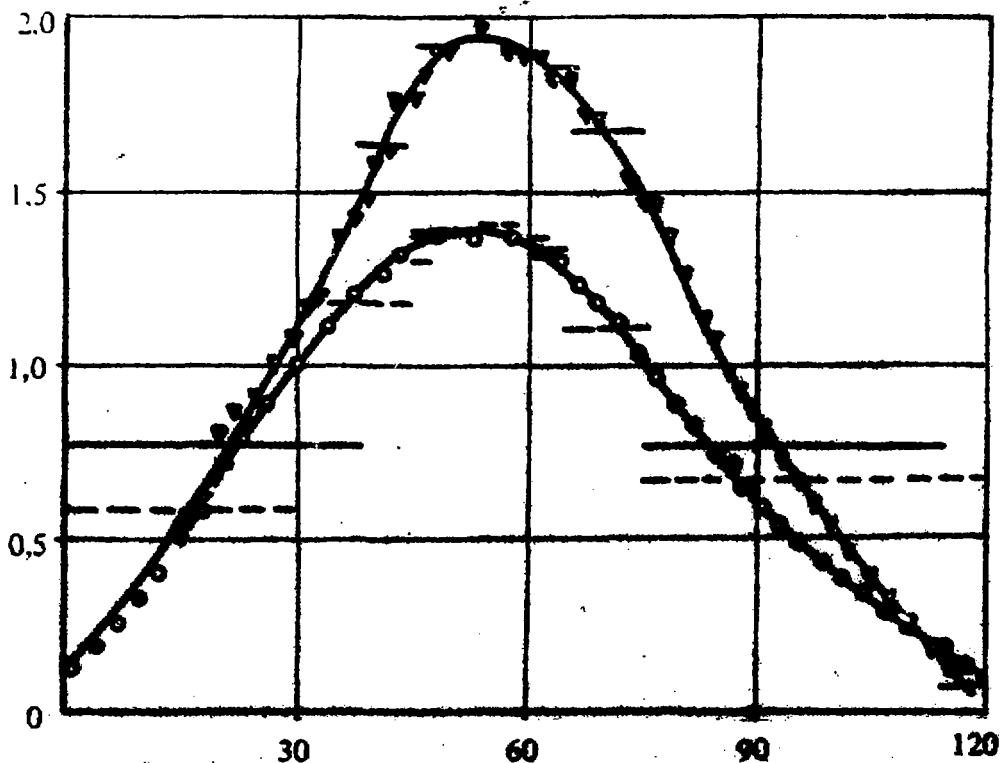


Рис. 7. Относительное высотное распределение плотности потока тепловых нейтронов в отражателях:

- | | | | |
|-----|---------------|---|-----------------|
| ○ | — эксперимент | } | графитовом, |
| --- | — расчет | | |
| ▼ | — эксперимент | } | комбинированном |
| — | — расчет | | |

пределения практически не отличаются одно от другого. Реализация тангенциальных каналов в отражателе на расстояниях от оси сборки в диапазоне 20 – 40 см снижает плотность потока в максимуме на 7 – 10%, не меняя его положения. Максимум высотного распределения для обоих отражателей лежит на расстоянии 55 см от нижнего торца сборки и не меняет своего положения при небольших изменениях конструкции отражателя и уровня раствора в сборке (по крайней мере на 3 – 5 см). Плотность потока тепловых нейтронов в максимуме высотного распределения по комбинированному отражателю на $\sim 30\%$ выше, чем по графитовому. Учитывая имевшуюся неопределенность в толщине корпуса, измерения проводились при двух значениях толщины 3 и 5 мм. Переход с толщины корпуса 3 мм на 5 мм уменьшает плотность потока тепловых нейтронов по радиусу и высоте отражателя на 6,1% и 1,6% соответственно.

Довольно сильное влияние на распределение оказывает положение рабочих органов СУЗ. Введение поглощающего стержня (ширина поглотителя 250 мм) до примерно половины высоты по раствору снижает плотность нейтронов на 6,3% и 15,8% по высоте и радиусу отражателя соответственно.

Таким образом, реализация каналов в отражателе и изменение толщины корпуса аппарата слабо влияют на плотность потока тепловых нейтронов. В комбинированном отражателе плотность потока в максимуме в целом на 30 – 35% выше, чем в графитовом, но при реализации вывода пучков с расстояния более 35 см от оси аппарата это преимущество ослабевает. Эксплуатацию реактора целесообразно вести при максимально извлеченных стержнях регулирования.

4.2. Распределение резонансных и быстрых нейтронов

Характер распределения плотности потока резонансных нейтронов (область 1 – 10000 эВ) оценивался по распределению плотности потока нейтронов с энергией 1,46 эВ, измеренного с помощью индиевых детекторов. Использовались фольги из набора АКН в кадмиевых экранах толщиной 0,5 мм. По выполненным оценкам вклад $1/v$ -составляющей сечения в общую активность равен 2,5%, и наведенная в результате реакции $In^{115}(n,\gamma)In^{116}$ активность в основном обусловлена поглощением нейтронов в области резонанса ($E_p \approx 1.46$ эВ). Суммарная погрешность измерения относительной

плотности потока резонансных нейтронов составила 3,6% при доверительной вероятности 95%. Измерения в графитовом отражателе проводились при толщине корпуса 3 мм и 5 мм, а в комбинированном — только при толщине 5 мм. Результаты измерений показаны на рис. 8 и 9 соответственно. В комбинированном отражателе, обладающем лучшими по сравнению с графитовым замедляющими свойствами, плотность потока резонансных нейтронов в среднем на 20 — 25% ниже. Изменение толщины корпуса практически не сказывается на распределении резонансных нейтронов (имеющиеся различия лежат в пределах ошибки измерений). Вблизи корпуса (в частности, вблизи максимума радиального распределения тепловых нейтронов) наблюдается резкое изменение величины плотности потока резонансных нейтронов по радиусу. На ~ 10 см в этой области плотность потока меняется более чем в два раза. Максимум высотного распределения почти совпадает с максимумом распределения тепловых нейтронов.

Распределение быстрых нейтронов ($E \geq 0,58$ МэВ) измерялось твердотельными трековыми детекторами (ТТД) осколков деления. В качестве детектора использовалось покровное стекло (ГОСТ 6672-59), а радиатором осколков служил тонкий слой нептуния-237 из набора АКН. Треки выявлялись травлением облученного детектора в 35%-ном растворе плавиковой кислоты при комнатной температуре в течение 20 мин. Подсчет треков производился визуально с помощью микроскопа МБИ-15. Каждый детектор обсчитывался по несколько раз. Погрешность определялась статистикой счета и составила 2 — 7,5% в зависимости от числа треков на детекторе (на периферии отражателя статистика падает и ошибка возрастает). Результаты измерений представлены на рис. 10. Имеет место экспоненциальный спад по радиусу отражателя, причем в случае комбинированного отражателя величина плотности потока быстрых нейтронов в два раза меньше, чем в случае графитового. Распределения резонансных и быстрых нейтронов имеют значительный градиент по радиусу, причем он наибольший как раз в области максимума радиального распределения тепловых нейтронов. Поэтому окончательный выбор места вывода пучка нейтронов из отражателя, для получения наилучших его параметров, целесообразно проводить с учетом характера распределения надтепловых нейтронов.

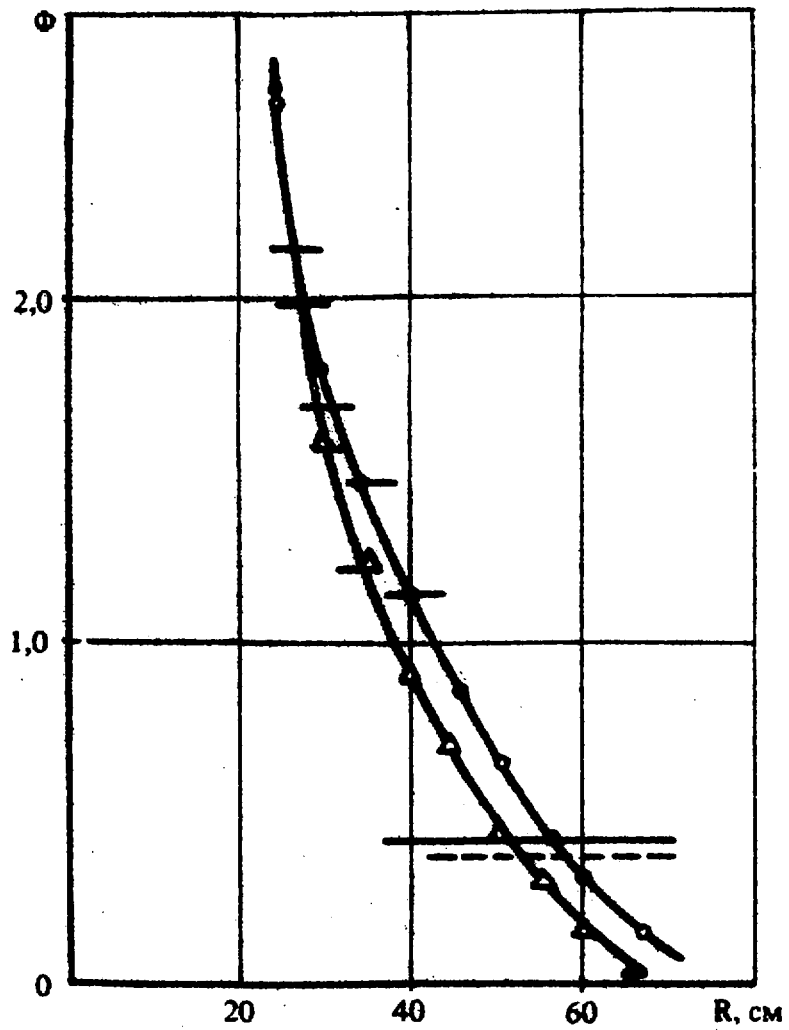


Рис. 8. Относительное радиальное распределение плотности потока резонансных нейтронов ($E \approx 1,46$ эВ) в отражателях:

- | | | |
|-----|---------------|-------------------|
| ● | - эксперимент | } графитовом |
| --- | - расчет | |
| ▲ | - эксперимент | } комбинированном |
| — | - расчет | |

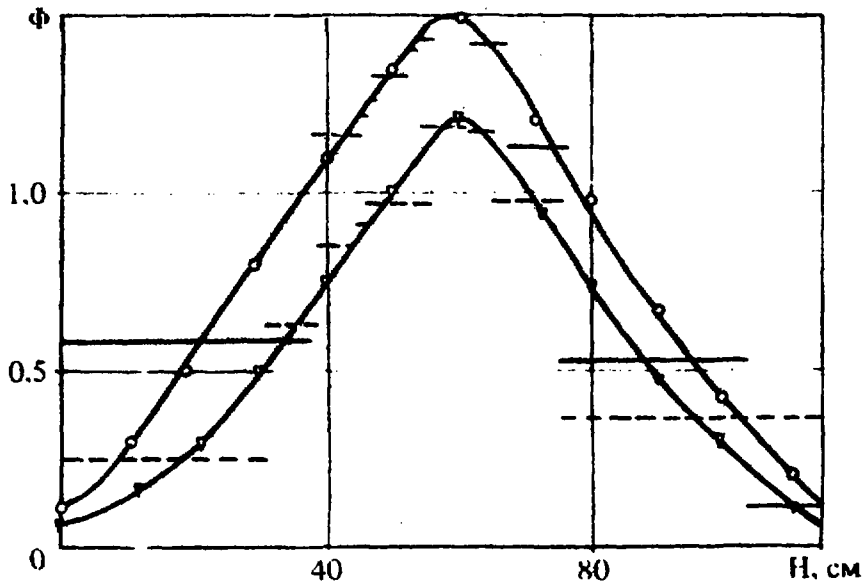


Рис. 9. Относительное высотное распределение плотности потока резонансных в отражателях:

- | | | | |
|-----|---------------|---|-----------------|
| ○ | - эксперимент | } | графитовом |
| --- | - расчет | | |
| ▼ | - эксперимент | } | комбинированном |
| — | - расчет | | |

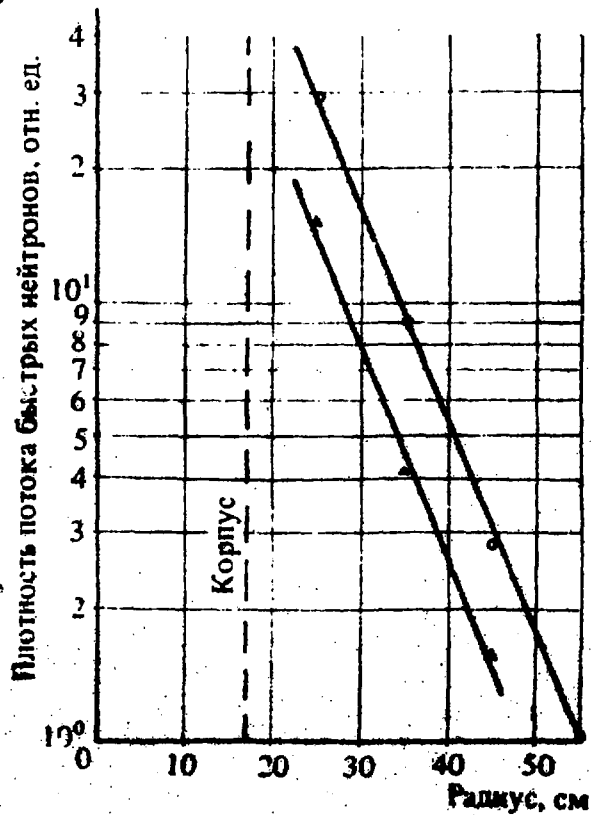


Рис. 10. Распределение плотности потока нейтронов ($E > 0,58$ МэВ)

4.3. Определение абсолютной мощности критсборки

Знание абсолютной мощности весьма важно для оценки производительности аппарата (качества реактора), а также полезно для абсолютной нормировки некоторых величин и эксплуатации критической сборки. Измерение абсолютной мощности осуществлялось радиохимическим методом. В основу этого метода положено определение числа делений, произошедших в растворе уранил-сульфата, путем нахождения количества ядер молибдена-99, образовавшихся в результате деления урана-235.

Скорость образования осколков деления (в том числе и молибдена-99) однозначно связана со скоростью деления, т.е. с мощностью W :

$$W = \frac{N \cdot 100}{t \cdot \alpha_{99} \cdot \beta \cdot 3,18 \cdot 10^{10}}$$

где N – число ядер молибдена-99; t – время облучения раствора на мощности W ; $\alpha_{99} = 6,1\%$ – выход ядер молибдена-99 на деление урана-235 тепловыми нейтронами; β – доля объема раствора, взятого на анализ.

Для радиохимического анализа отбирались пробы объемом 5 см^3 после тщательного перемешивания раствора в сборке. Количество ядер молибдена-99 определялось по результатам радиометрического обсчета "весовых" мишеней, полученных из отобранных проб:

$$N = \left\{ \left[\frac{N_i / \Delta t}{(1 - N_i / \Delta t) \cdot \tau_m} - \bar{N}_\phi \right] \right\} \frac{k \cdot e^{\lambda(\tau + \Delta t / 2)}}{\lambda \alpha \gamma} \eta_{99},$$

где N_i – измеренное число отсчетов "весовой" мишени за время Δt ; τ_m – мертвое время счетчика; \bar{N}_ϕ – средняя скорость счета фона; $0,9$ – приборная константа; $\lambda = 2,9171 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ – постоянная распада молибдена-99; K – коэффициент обратной эффективности радиометрической установки; τ – время выдержки; α – экспериментально определяемый в ходе анализа коэффициент химического выхода молибдена-99; γ – поправка на распад во время облучения; η – поправка, учитывающая образование ядер молибдена-99 за время выхода аппарата на стационарный уровень мощности.

При выбранных условиях было получено значение мощности, равное $4,0 \pm 0,5$ Вт для обоих типов отражателя, что хорошо согласуется с величиной мощности, измеренной методом Феймана [6] и равной $4,4 \pm 0,8$ Вт и $4,1 \pm 0,8$ Вт для графитового и комбинированного отражателей соответственно. По полученным значениям мощности была прокалибрована контрольно-измерительная аппаратура и мониторы в центральном канале.

4.4 Измерение абсолютных плотностей потока нейтронов

Абсолютное значение плотностей потока (в первую очередь теплового) имеет значение для оценки эффективности аппарата как источника нейтронов и определения его качества, т.е. производительность.

Измерение абсолютной плотности потока тепловых нейтронов проводилось двумя независимыми способами: методом твердотельных трековых детекторов и активационным методом. Для вычисления плотности потоков применялась теоретическая модель Весткотта [7].

При использовании ТТД была использована методика определения эффективной температуры нейтронов [8]. Измерения осуществлялись интегральным способом, причем в качестве поглотителя, имеющего резонанс в тепловой области, был использован тонкий плутониевый слой ($E_p \approx 0,293$ эВ) а $1/v$ -поглотителем служил тонкий урановый слой (уран-235). Температура T вычислялась из соотношения скоростей деления плутониевого (N_{29}) и уранового (N_{25}) детекторов и кадмиевого отношения $1/v$ поглотителя (R_{cd}):

$$\frac{N_{29}}{N_{25}} = B \frac{[g_{29}(T)F_T^{29} + r S_{29}(T)F_p^{29}]}{[g_{25}(T)F_T^{25} + r S_{25}(T)F_p^{25}]},$$

$$R_{cd} = \frac{N_{25}}{N_{cd}} = \frac{[g_{25}(T)F_T^{25} + r\{S_{25}(T)F_p^{25}G - g_{25}(T)W_{25}F_p^{25}G\sqrt{T/T_0} + g_{25}(T)F_T^{25}/k\sqrt{T/T_0}\} + hg_{25}(T)F_T^{25}]}{}$$

где B — калибровочная константа, определенная в результате облучений в тепловой колонне реактора $\Phi-1$, спектр которой полностью термализован; $g(T)$ и $S(T)$ — параметры, учитывающие отклонение сечений от закона $1/v$ в тепловой и эпитепловой областях соответственно; значения их в зависимости от T даны в работе [7];

Γ — эпитепловой индекс, характеризующий соотношение эпитепловой и тепловой составляющей потока нейтронов; F_T и F_R — коэффициенты самоэкранирования тепловых и резонансных нейтронов; G и h — коэффициенты пропускания резонансных и тепловых нейтронов кадмиевым экраном; W — поправка на отклонение сечений от закона $1/v$ в области от нижней границы надтеплого спектра E_{TR} до энергии кадмиевой отсечки E_{Cd} ; K — коэффициент, учитывающий толщину и форму кадмиевого экрана.

Значения параметров F_T , F_R , G , h , W , K (вычисленные по данным [5,7]) приведены в работе [8] для применяемых детекторов. Измерения проводились в центре места выводов пучков, реализованных в графитовом отражателе на высоте 55 см от нижнего торца и 35 см и 23 см от оси сборки. Полученные результаты представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Результаты определения эффективной температуры нейтронов

Канал	60/180	60/80
Координаты места вывода	$r \approx 23$ см; $H \approx 55$ см	$r \approx 35$ см; $H \approx 55$ см
R_{Cd} (по U-235)	$16,7 \pm 0,2$	$31,7 \pm 0,3$
T (К)	$0,1030 \pm 0,0003$	$0,0467 \pm 0,0003$
	323 ± 20	296 ± 20

Видно, что спектр в более "тонком" канале существенно мягче. По полученным результатам была рассчитана абсолютная плотность потока тепловых и эпитепловых нейтронов в точках измерений:

$$\Phi_T = \frac{N_T}{V_B(T) \sqrt{E/2} \sqrt{T/T_0} F_T t} ; \Phi_{эл} \approx r \Phi_T ,$$

где t — время облучения.

Калибровочная константа V определялась из измерения в известном потоке тепловых нейтронов в тепловой колонне реактора Ф-1. Вклад в интенсивность реакции тепловой компоненты потока N_T определяется из соотношения

$$N_T = N \left(1 - \frac{F_{Cd}}{R_{Cd}} \right),$$

где $F_{Cd}(U-235) = 2,24$ коэффициент кадмиевой поправки, учитывающий захват нейтронов кадмием с энергией от $E_{гр}$ до E_{Cd} . Величины плотностей потоков приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Абсолютные плотности потока нейтронов,
измеренные с помощью ТТД (мощность 4 Вт)

Канал	60/180	60/80
Координаты места вывода	$r = 23$ см; $H = 55$ см	$r = 35$ см; $H = 55$ см
$\Phi_T \cdot 10^{-7}$ н/(см ² ·с)	$4,4 \pm 0,6$	$(4,0 \pm 0,6)$
$\Phi_{эл} \cdot 10^{-6}$ н/(см ² ·с)	$4,5 \pm 0,6$	$(1,9 \pm 0,6)$

Соотношения между потоками, измеренными на разном расстоянии от оси, хорошо согласуются с результатами относительных измерений.

В основу активационных измерений положен метод $\beta - \gamma$ - совпадений, позволяющий по известным соотношениям определить абсолютную активность детекторов $C^\infty(\delta)$, содержащих радиоактивный изотоп с простой схемой распада. В качестве детекторов в настоящих измерениях служили толстые золотые фольги диаметром 10 мм и толщиной $\delta = 100$ мг/см².

Абсолютная плотность потока тепловых нейтронов может быть оценена из соотношения

$$\Phi_T = \frac{C^\infty(\delta) \left[1 - \frac{F_{Cd}(\delta_{Au}, \delta_{Cd})}{R_{Cd}} \right]}{g(T) \varrho \sigma(2200)_{акт} \frac{\sqrt{v}}{2} \sqrt{T/T_0} F_T},$$

где ϱ - число ядер в фольге; $\sigma(2200)_{акт}$ - сечение активации золота при скорости нейтронов 2200 м/с.

Плотность потока эпитепловых нейтронов получается из выражения

$$\Phi_{эн} = \frac{\Phi_T \sqrt{\pi}/2 g(T) \sqrt{T/\tau_0} \beta(2200)_{акт}}{[R_{cd}(0) - F_{cd}(0)] \int_{акт}}$$

где $\int_{акт}$ - активационный интеграл:

$$R_{cd}(0) = 1 + \frac{F_p(\delta)}{F_T(\delta)} [R_{cd}(\delta) - 1] .$$

Общая ошибка определения Φ_T составила 7% при доверительной вероятности 95%. Результаты измерений даны в табл. 5.

Из приведенных результатов видно, что величина плотности потока нейтронов в центральном канале определяется главным образом изменениями активной зоны, а не отражателя. Реализация тангенциальных каналов (в таблице даны координаты их места вывода) приводит к снижению плотности потока тепловых нейтронов в месте вывода на $\sim 25\%$, что согласуется с результатами относительных измерений. Измерения в канале 60/80, проведенные двумя независимыми методами, дали значения, хорошо согласующиеся между собой.

Соотношение между плотностями потока тепловых нейтронов в комбинированном и графитовом отражателях составило $\sim 1,2 \pm 0,1$ (при $r \approx 35$ см). Некоторое отличие от результатов относительных измерений связано с систематической погрешностью результатов измерений активности медных детекторов, в которых не учитывался вклад в активность эпитепловой составляющей потока. Используя настоящие данные, а также результаты определения абсолютной мощности и относительных измерений можно оценить качество реактора $Q = \Phi_T / W$ при реализации вывода пучков из максимума радиального распределения ($r \approx 23$ см и $r \approx 20$ см для графитового и комбинированного отражателей соответственно). Расчет дает следующие величины:

графитовый отражатель $(1,3 \pm 0,2) \cdot 10^{10}$ н/(см².с)/кВт,

комбинированный отражатель $(1,74 \pm 0,20) \cdot 10^{10}$ н/(см².с)кВт.

Таким образом, можно ожидать, что производительность аппарата с комбинированным отражателем будет примерно на 30% выше, чем с графитовым.

Таблица 5

Результаты измерений абсолютных плотностей потока нейтронов (мощность 4 лВт)

Состояние сборки и координаты точки измерений	Активационные измерения			Измерения с ГТД	
	R _{Cd}	Φ_T н/(см ² ·с)	$\Phi_{ЭП}$ н/(см ² ·с)	Φ_T н/(см ² ·с)	$\Phi_{ЭП}$ н/(см ² ·с)
Организатор графитовый без каналов					
Организатор графитовый с двумя каналами					
Организатор кокс					

4.5. Исследование параметров пучков нейтронов

По результатам измерений пространственного распределения нейтронов по отражателю в нем на расстоянии 35 см от центральной оси и на высоте 55 см от нижнего торца сборки были реализованы конусообразные каналы с паяльным диаметром 60 мм и диаметрами на выходе из отражателя 180 мм и 80 мм с апертурой $10,5^\circ$ и $1,8^\circ$ соответственно. Коллимация пучков осуществлялась кадмиевыми экранами толщиной 1 мм. Начало коллиматора из кадмия определялось требованием, чтобы угол $\alpha = d_{ef} / R$ (под которым на расстоянии R от источника нейтронов с эффективным диаметром d_{ef} видна его поверхность) не превышал 1° . Для $R = 365$ см это требование выполняется при выводе экрана с расстояний 25 см и 40 см от начала пучков 60/180 и 60/80 соответственно.

Частичное моделирование вывода пучка нейтронов в реакторе за отражатель достигалось посредством кадмиевой конусообразной приставки длиной (по оси) 2,5 м для канала 60/180.

Было измерено распределение плотности потока нейтронов по сечению пучка на разных расстояниях от места вывода. Анализ полученных данных позволил отметить неравномерности плотности потока нейтронов по сечению пучка на расстоянии 315,5 см и установить закономерность изменения плотности потока тепловых нейтронов по оси пучка.

Измерения проводились активационным методом с помощью диспрозиевых и медных фольг диаметром 10 мм. Активность детекторов измерялась на β -спектрометрах, работающих в мониторинжном режиме.

Распределение плотности потока тепловых нейтронов по сечению пучка и среднее значение плотности потока по сечению в относительных единицах оценивались по результатам измерения в двух взаимно перпендикулярных направлениях в сечении пучка. Изменение плотности потока тепловых нейтронов на оси пучка определялось по отношению средней плотности потока в месте вывода и в рассматриваемом сечении. Ошибка составила около 6% при доверительной вероятности 95%, причем статистическая погрешность измерения активности не превышала 1%. Результаты определения изменения плотности потока по оси пучка 60/180 в графитовом отражателе даны в табл. 6.

Плотность потока тепловых нейтронов по оси пучка

Расстояние от места вывода пучка, см	Отношение средней плотности потока нейтронов в месте вывода пучка к средней плотности потока по сечению (60/180, отражатель графитовый) *	
	Место вывода пучка, расстояние от центральной оси, см	
	г = 35	г = 23
25	1	-
65	147	-
156,5	2134	1925
315,5	10947	9471

* При $г = 35$ $\frac{\Phi_{60/80}}{\Phi_{60/180}} = 0,974;$
 $г = 23$ $\frac{\Phi_{60/80}}{\Phi_{60/180}} = 0,911.$

Из таблицы видно, что на расстоянии 315,5 см плотность потока падает примерно в 10^4 раз, причем анализ результатов показывает, что с расстояния 150 см изменение плотности потока обратно пропорционально квадрату расстояния R от источника с эффективным диаметром d_{ef} , расположенного на расстоянии 25 см от места вывода. Это хорошо согласуется с требованием точечности источника, которое выполняется при условии $d_{ef}/R \ll 0,02$. Сопоставление полученных данных с результатами абсолютных измерений позволяет сделать вывод, что для обеспечения величины плотности потока тепловых нейтронов $10^7 - 10^8$ н/(см².с) на выходе пучка из защиты реактора (≈ 3 м от отражателя) мощность аппарата должна составлять 20 – 30 кВт.

На рис. 11 приведены результаты измерений распределений плотности потока тепловых нейтронов по двум взаимно перпендикулярным направлениям в месте вывода пучков для графитового и комбинированного отражателей. Неравномерность в этом сечении не превосходит 6%, что хорошо согласуется с относительными измерениями. Аналогичные результаты для сечения на расстоянии 315,5 см даны в табл. 7

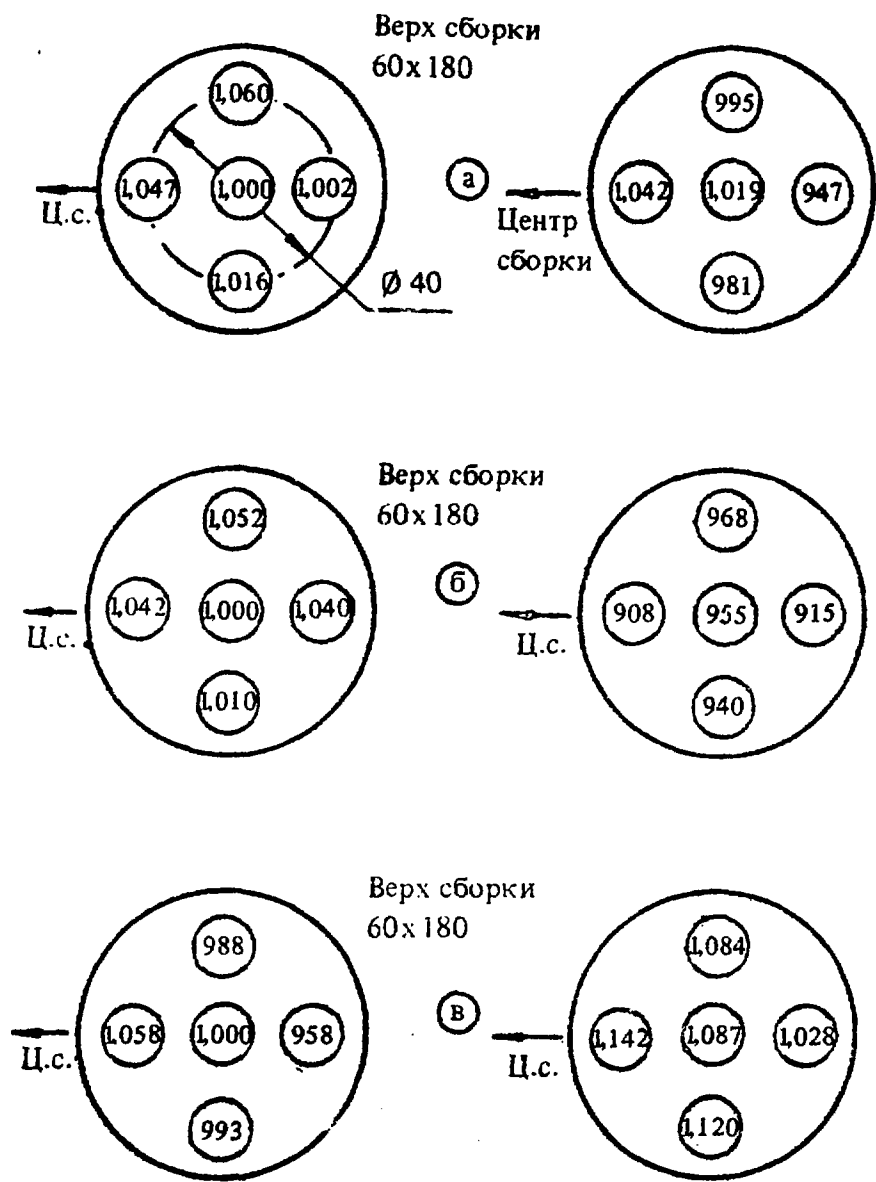


Рис. 11. Относительное распределение плотности потока тепловых нейтронов по сечению места вывода пучка из отражателя: а — отражатель графитовый, координаты места вывода: $r \approx 35$ см, $H \approx 55$ см; б — отражатель графитовый, координаты места вывода: $r \approx 23$ см, $H \approx 55$ см; в — отражатель комбинированный, координаты места вывода: $r \approx 35$ см, $H = 55$ см

Таблица 7

Распределение плотности потока тепловых нейтронов
по двум взаимно перпендикулярным направлениям
в сечении на расстоянии 315,5 см от оси сборки

Расстояние от центра пучка, см	Относительное распределение по сечению пучка 60/180		
	Место вывода пучка, расстояние от центральной оси, см		
		r = 35	r = 23
Направление, параллельное центральной оси (направление I)	28	-	0,991
	20	0,986	1,013
	12	1,018	1,007
	4	0,976	1,001
	2	-	0,992
	0	1,003	-
	-2	-	1,010
	-4	1,001	0,975
	-12	1,029	1,020
	-20	0,984	0,992
	-28	-	0,990
Направление, перпендикулярно направлению I	-20	1,044	0,993
	-12	1,019	0,995
	-4	0,966	1,013
	-2	-	1,033
	0	1,003	-
	2	-	1,011
	4	1,020	0,968
	12	1,012	1,013
	20	0,981	0,986
	28	1,006	0,992

Результаты отнормированы на среднее значение плотности потока по соответствующему сечению. Обработка данных методом наименьших квадратов показала, что неравномерности распределения по двум взаимно перпендикулярным направлениям в среднем не превышает 2%.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА НЕКОТОРЫХ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРИТСБОРКИ

Целью расчетов в основном являлась апробация расчетных методик для исследования нейтронно-физических характеристик рассматриваемого типа реакторов. Кроме того, при совпадении результатов расчетов и экспериментов появляется большая уверенность в надежности полученных данных. Расчетным путем в некоторых случаях можно получить более широкую информацию, чем экспериментальным, поскольку в последнем случае это может быть связано с большими практическими трудностями.

Рассчитывались и сравнивались с измеренными следующие параметры:

- температурный эффект реактивности;
- влияние толщины корпуса на реактивность;
- эффективный коэффициент размножения и зависимость крит-массы от концентрации урана в растворе;
- распределение плотности потока нейтронов в сборке и ее абсолютные значения.

В методическом плане расчет данной критсборки представляет определенные трудности. Это обусловлено геометрической сложностью рассматриваемой системы, наличием воздушной полости над раствором и др. Наиболее корректно можно рассчитывать сборку, используя метод Монте-Карло. Расчеты выполнены по программам RIT [9] и ММК-22 [10]. При использовании метода Монте-Карло затруднен расчет малых эффектов, поэтому для их оценки применялась двумерная диффузионная программа GABI [11].

В табл. 8 представлены расчетные и экспериментальные значения температурного эффекта реактивности при нагреве раствора от 22 до 88°C и эффект реактивности при увеличении толщины стального корпуса с 3 до 5 мм (экспериментальные значения приведены для $\beta_{\text{тер}} = 0,7\%$).

Т а б л и ц а 8

Эффективность при нагреве раствора и увеличении толщины корпуса

Эффект, %	Эксперимент	Расчет
Температурный (22°C – 88°C), %	– (2,0 ± 0,1)	– 1,59
При увеличении толщины корпуса с 3 до 5 мм	– (0,64 ± 0,05)	– 1,99

Различие между экспериментальными и расчетными результатами может быть связано с упрощениями геометрии аппарата в расчетной модели.

В табл. 9 приведены результаты расчетов эффективного коэффициента размножения нейтронов при различной концентрации урана в растворе. Поскольку в расчетной схеме не учтены два канала для стержней аварийной защиты, то расчетные результаты поправлены на оцененную по теории возмущений величину отрицательной реактивности, вносимой этими каналами.

Т а б л и ц а 9

Результаты определения $K_{эф}$ при различной концентрации раствора

Концентрация урана в растворе, г/л	44,8	70	80
$K_{эф}$ (расчет) отражатель ^C	$1,016 \pm 0,009$	$1,013 \pm 0,006$	$1,018 \pm 0,010$
Вс - С	$1,015 \pm 0,008$	$1,015 \pm 0,006$	$1,002 \pm 0,010$
$K_{эф}$ (эксп.) отражатель ^C	$1,000 \pm 0,001$	$1,000 \pm 0,002$	$1,001 \pm 0,010$
Вс - С			

Расчетные результаты систематически завышены по сравнению с измеренными значениями, что связано с отсутствием в схеме расчета некоторых элементов в активной зоне (стальная барботажная трубка, заливная трубка, термпары и др.) и неточной оценкой физического веса каналов АЗ.

На рис. 6 - 9 приведены расчетные относительные распределения плотности потоков тепловых и резонансных ($E_p \approx 1,46$ эВ) нейтронов по радиусу и высоте отражателя. На тех же рисунках даны соответствующие зависимости, полученные экспериментально. Имеет место хорошее согласие результатов. В табл. 10 представлены экспериментальные и расчетные значения абсолютных плотностей потоков тепловых и быстрых нейтронов в точках, расположенных на расстоянии 55 см от нижнего торца отражателя, 25 см и 35 см от центральной оси.

Результаты расчета и эксперимента согласуются в пределах погрешности определения соответствующих параметров. Имеющиеся различия обусловлены, по-видимому, геометрическими упрощениями расчетной схемы и неточностями состава отражателя.

Абсолютная величина плотности потока тепловых и быстрых нейтронов

Композиция сборки	Φ_T , н/(см ² .с)		Φ_B , н/(см ² .с)	
	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет
Графитовый отражатель				
($r = 35$ см, $H = 55$ см)	$(5,19 \pm 0,36) \cdot 10^7$	$5,5 \cdot 10^7$	-	-
$r = 25$ см, $H = 55$ см)	-	-	$(1,6 \pm 0,2) \cdot 10^7$	$1,74 \cdot 10^7$
Комбинированный отражатель				
($r = 35$ см, $H = 55$ см)	$(4,8 \pm 0,3) \cdot 10^7$	$6,05 \cdot 10^7$	-	-
$r = 25$ см, $H = 55$ см)	-	-	$(0,8 \pm 0,1) \cdot 10^7$	$0,93 \cdot 10^7$

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследованы на критической сборке основные нейтронно-физические характеристики опытного образца растворного реактора для лаборатории нейтронной радиографии.

2. Определены физические параметры, необходимые для ядерно-безопасной эксплуатации реактора, в том числе эффекты реактивности при некоторых неисправностях технологической системы аппарата. Полученные данные обеспечивают оптимальный выбор концентрации урана в растворе, загрузки реактора и требуемого запаса реактивности для работы на номинальных уровнях мощности.

3. Проведено сравнительное изучение условий формирования пучков нейтронов и параметров самих пучков для реактора с графитовым и графито-бериллиевым (центральная вставка из бериллия) отражателями. Показано, что качество реактора по тепловым нейтронам в реакторе с комбинированным отражателем на 30 – 40% выше, чем с графитовым.

4. Рассчитаны основные характеристики критической сборки. Из сравнения расчетных и экспериментальных результатов проведена корректировка программ расчета, используемых в дальнейшем при проектировании реактора "Аргус".

5. Результаты исследований могут быть полезными для прогнозирования нейтронно-физических характеристик малогабаритных активных зон с водородосодержащим замедлителем.

Список литературы

1. Тюфяков Н.Д., Штань А.С. Основы нейтронной радиографии. М.: Атомиздат, 1975.
2. Методы неразрушающих испытаний./Под ред. Р. Шарпа. М.: Атомиздат, 1972.
3. Henric J.O. Atomic international L-88 reactor for Neutron Radiography. — *Isotops and Rad. Tec.*, 1971, v. 9, №1, p. 41.
4. Воронин А.А., Остапенко В.В. Автоматизация измерений реактивности. Препринт ИАЭ-1689. М., 1968.
5. Бекурц К., Виртц К. Нейтронная физика. М.: Атомиздат, 1968.
6. Кипин Дж.Р. Физические основы кинетики ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1967.
7. Westcott H.C. AECL-1101, 1960.
8. Богомолов А.М., Молодцов А.Д., Тихонов Л.Я. Измерение температуры нейтронного газа с помощью твердотельных трековых детекторов осколков деления. — *Атомная энергия*, 1977, т. 42, вып. 3, с. 228.
9. Каминский А.С., Майоров Л.В. Программа РТТ для расчета распределения медленных нейтронов в реакторах методом Монте-Карло. — В сб.: Докл. на Втором совещании ВМК по физике реакторов ВВР. 1974.
10. Франк-Каменецкий А.Д. Программа многогруппового расчета реакторов и ячеек ММК-22. Препринт ИАЭ-2777. М., 1977.
11. Двумерная диффузионная программа "GABГ". — В сб.: Докл. по программам и методам физического расчета быстрых реакторов СЭВ. Димитровград, 1975, с. 163.

Редактор Л.И. Кирюхина
Технический редактор Н.И. Малькова
Корректор Г.Я. Кармадонова

Т-22088. 17.08.81. Формат 60x90/16. Уч.-изд. л. 1,9
Тираж 133. Цена 19 коп. Индекс 3624. Заказ 4805

Отпечатано в ИАЭ

РУБРИКАТОР ПРЕПРИНТОВ ИАЗ

1. Общая теоретическая и математическая физика
2. Ядерная физика

3. Общие проблемы ядерной энергетики
4. Физика и техника ядерных реакторов
5. Методы и программы расчета ядерных реакторов

6. Теоретическая физика плазмы
7. Экспериментальная физика плазмы и управляемый термоядерный синтез
8. Проблемы термоядерного реактора

9. Физика конденсированного состояния вещества
10. Физика низких температур и техническая сверхпроводимость
11. Радиационная физика твердого тела и радиационное материаловедение

12. Атомная и молекулярная физика
13. Химия и химическая технология

14. Приборы и техника эксперимента
15. Автоматизация и методы обработки экспериментальных данных
16. Вычислительная математика и техника

Индекс рубрики дается через дробь после основного номера ИАЗ.



