

скольких часов работы камеры и электронной аппаратуры не наблюдалось изменения скорости счета импульсов (с учетом распада  $^{252}\text{Cf}$ ), превышающего статистическую погрешность ( $< 0,1\%$ ).

Абсолютное число ядер  $^{239}\text{Pu}$  в слое находили по скорости  $\alpha$ -распада ядер плутония (аналогично калибровке  $^{243}\text{Am}$ ). Затем слой плутония помещали в камеру деления. Таким образом, были изготовлены несколько камер деления и одновременно с ними идентичные по конструкции и электрическим параметрам камеры деления со слоем  $^{252}\text{Cf}$ . Полная идентичность изготовления всех камер деления по всем параметрам могла послужить в определенной степени доказательством, что формы распределенных импульсов от осколков делений в низкоэнергетических частях аппаратурных спектров будут одинаковы. Сравнивая эти экспериментальные спектры (см. рис. 2), можно сделать вывод, что ниже уровня дискриминации формы распределенных импульсов от осколков делений,  $\alpha$ -частиц и шумов аппаратуры идентичны для всех камер, а поэтому с уверенностью можно считать, что идентичны и формы распределений осколков делений ниже уровня дискриминации. Таким образом, определяя полную эффективность регистрации осколков деления в камере со слоем  $^{252}\text{Cf}$  для разных уровней дискриминации, можно найти полную эффективность регистрации осколков деления и для камеры со слоем плутония. Эффективность камеры деления со слоем  $^{252}\text{Cf}$  была измерена методом некоррелированного фона нейтронов (с точностью лучшей  $0,2\%$ ), который подробно описан в работах [2—4]. Полная эффективность регистрации осколков делений в камере со слоем плутония составляла  $0,95—0,97$  (в зависимости от уровня дискриминации). Ниже показаны источники и значения погрешностей (%) при определении абсолютного числа делений  $^{239}\text{Pu}$ :

Статистическая погрешность . . . . .	0,15
Полная эффективность регистрации актов делений в слое камеры деления и просчеты	0,4
Число ядер $^{239}\text{Pu}$ в слое камеры деления . . . . .	0,34
Вклад от делений присутствующих в слое $^{240}\text{Pu}$ и $^{241}\text{Am}$ . . . . .	0,15
Общая погрешность абсолютного числа делений	0,55

Измеряя отношение сечения захвата в  $^{238}\text{U}$  к сечению деления  $^{239}\text{Pu}$ , камеру деления вместе с фольгами (так называемая геометрия «back to back») помещали в полость исследуемой зоны (таблица). Видно, что результаты измерений абсолютной методикой и методикой с использованием калибровки в тепловой колонне совпадают

УДК 621.039.5.56

## Стабилизация аксиального поля ВВЭР-1000

АФАНАСЬЕВ А. М., ТОРЛИН Б. З.

При увеличении размеров и теплонапряженности реактора пространственная устойчивость (ПУ) нейтронного поля ухудшается [1, 2]. В настоящей статье предпринята попытка рассмотреть следующие вопросы: гарантируется ли ПУ ВВЭР-1000 по отношению к аксиальным ксеноновым колебаниям, хотя у этого реактора (как и у ВВЭР-440) мощностные коэффициенты реактивности (МКР) будут отрицательными, и как влияет систе-

## Результаты измерений отношения $C^8/F^9$ в быстрых критических сборках БФС

Сборка	Метод	
	Абсолютные измерения	Калибровка в тепловой колонне
БФС-31-3	$0,1550 \pm 0,0017$ [7]	$0,1580 \pm 0,0043$ [7]
БФС-33-1-1	$0,1500 \pm 0,0017$ [7]	$0,1530 \pm 0,0042$ [7]
БФС-35-1	$0,1121 \pm 0,0012$	$0,1130 \pm 0,0030$
БФС-35-2	$0,1114 \pm 0,0012$	$1,1122 \pm 0,0030$

в пределах экспериментальных погрешностей. Однако представляло интерес сравнить результаты измерения абсолютной методикой с результатами измерений на совокупном международном экспериментальном стандарте SCHERZO-556 [5, 6]. С этой целью были проведены измерения на сборке БФС-35 [7], аналогичной по своим параметрам сборкам, вошедшим в SCHERZO-556.

Измеренные отношения сечений на сборках БФС-35-1 и БФС-35-2 переносились на SCHERZO-556 аналогично переносу, проведенному в работах [5, 6]. Для БФС-35-1,2  $C^8/F^9 = 1,1051 \pm 0,0012$ ; для SCHERZO-556  $C^8/F^9 = 0,1057 \pm 0,0015$  [6] и  $0,1046 \pm 0,0015$  [5]. Сравнение результатов переноса указывает на хорошее согласие.

В заключение авторы выражают благодарность Ю. А. Казанскому за полезные обсуждения.

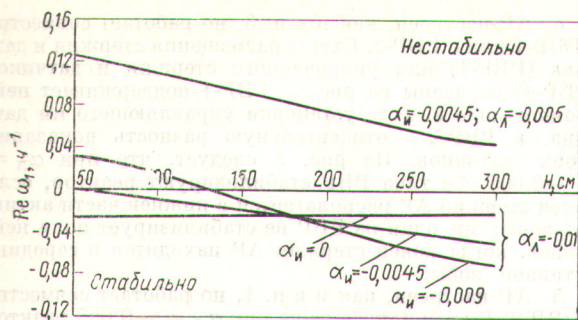
Поступило в Редакцию 12/VIII 1977 г.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chawla R., Besant C. «J. Brit. Nucl. Energy Soc.», 1970, v. 9, N 1, p. 28.
2. Doolin V., Mozhaev V. «Nucl. Instrum. and Methods», 1972, v. 105, p. 277.
3. Ефименко В. Ф., Можаяев В. К., Дулин В. А. «Атомная энергия», 1975, т. 39, вып. 1, с. 54.
4. Можаяев В. К. «Атомная энергия», 1976, т. 40, вып. 2, с. 174.
5. Darroutet M. e.a. In: Proc. IAEA Symp. «Fast Reactor Physics». Tokyo, 1973, v. 1. Rep. A-28.
6. Chaudat J. e.a. Rep. CEA-R-4552; Rep. KFK-1865, 1974.
7. Белов С. П. и др. Изучение отношения захвата в  $^{238}\text{U}$  к делениям  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{235}\text{U}$  в быстрых критических сборках. Докл. на Всесоюз. семинаре по резонансному поглощению нейтронов. М., 21—23 июня 1977 г.

ма автоматического регулирования (АР) на ПУ этого реактора.

Степень аксиальной устойчивости (АУ) ВВЭР-1000 определяли по рассчитываемой программой ИРИНА (см. настоящий выпуск, с. 487) величине  $\text{Re } \omega_1$ , где  $\omega_1$  — обладающая наибольшей действительной частью собственной комплексная частота аксиальных колебаний



Р и с. 1. Зависимость  $Re \omega_1$  от высоты размещения в активной зоне конца стержня АР, поддерживающего мощность реактора

нейтронного поля\*. В основу программы положена традиционная система линеаризованных уравнений, описывающих в одногрупповом приближении нейтронное поле с учетом МКР, изменения концентраций ксенона и йода [1, 2]. Кроме того, в ней в явной форме учитываются алгоритмы работы АР и регуляторов высотного распределения (РВР) [3]. Вычисления проведены при следующих значениях основных физических параметров: высота активной зоны  $H_0 = 355$  см, эффективные торцовые добавки по 12,5 см, квадрат длины миграции  $71 \text{ см}^2$ , средняя плотность потока тепловых нейтронов  $6 \cdot 10^{13}$  нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ ,  $\sigma_{\text{хе}} = 1,65 \cdot 10^6$  б, ксеноновый коэффициент реактивности 0,029, коэффициент аксиальной неравномерности потока нейтронов  $K_z = 1,103$ . В расчетах принималось стационарное распределение потока нейтронов в ВВЭР-1000 с максимумом, смещенным в нижнюю часть аппарата, и коэффициентом неравномерности  $K_z = 1,103$ . Ожидается [4], что МКР для ВВЭР-1000 будут иметь следующие значения:  $\alpha_{\text{л}} = -0,01$  (локальный) и  $\alpha_{\text{н}} = -0,0045$  (интегральный).

Определяемое ими относительное изменение коэффициента размножения  $\delta\rho(z, t)$  в точке  $z^{**}$  по высоте реактора в момент  $t$  записывалось в виде

$$\delta\rho(z, t) = K_z \left[ \alpha_{\text{л}}\varphi(z, t) + \alpha_{\text{н}} \frac{1}{H_0} \int_0^z \varphi(z', t) dz' \right],$$

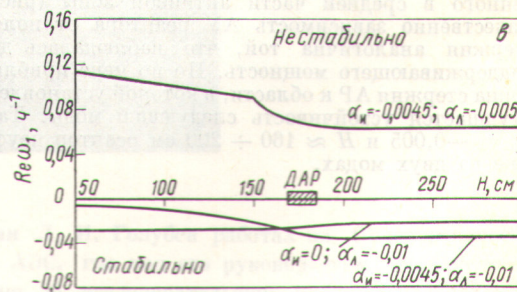
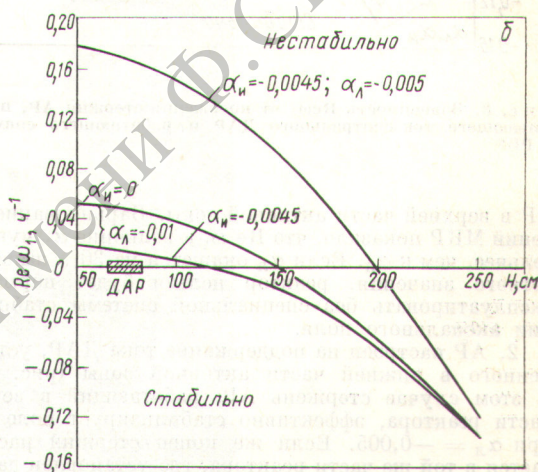
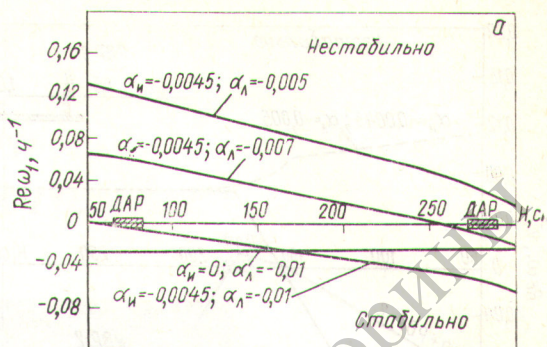
где  $\varphi(z, t)$  — отклонение потока нейтронов от стационарного его распределения. Значения МКР изменяются в течение кампании; кроме того, они определены с невысокой точностью и поэтому в расчетах варьировались.

Ранее было показано [4], что имеет смысл говорить о ПУ реактора только с конкретной системой АР. Рассмотрим результаты изучения влияния высоты  $H$  размещения в активной зоне конца стержня\*\*\* АР на устойчивость ВВЭР-1000 при различных программах его регулирования и различном расположении датчиков автоматического регулирования (ДАР).

\*  $Re \omega_1$  является периодом разгона колебаний (если она положительна) или декрементом затухания возмущения (если отрицательна). Поэтому устойчивым состоянием реактора соответствует  $Re \omega_1 < 0$ .

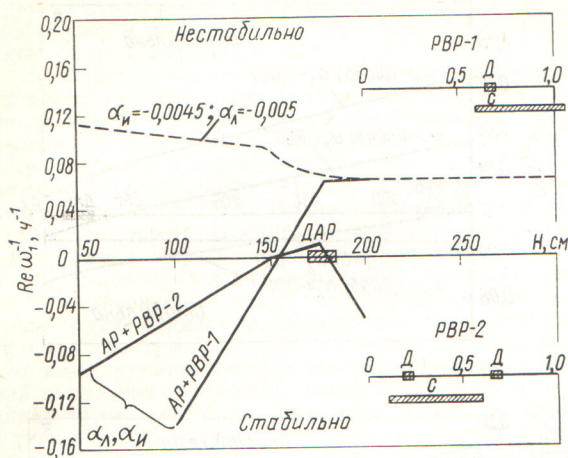
\*\* Начало координат на нижнем конце активной зоны со стороны входа теплоносителя.

\*\*\* Имеется в виду группа стержней, одновременно работающих в системе АР.



Р и с. 2. Зависимость  $Re \omega_1$  от положения стержня АР, поддерживающего суммарный ток двух ДАР (а), токи нижнего (б) и центрального (в) ДАР

1. АР настроен на поддержание мощности (интеграла потока по высоте) реактора (рис. 1) или суммарного тока ДАР (например, ионизационных камер), размещенных, как показано на рис. 2, а. Из них следует, что при расчетных значениях МКР реактор обладает АУ в широком диапазоне изменения  $H$ , хотя время его успокоения довольно велико ( $\sim 25$  ч). В полном соответствии с соображениями, высказанными в работе [2], АУ реактора заметно выше при размещении стержня



Р и с. 3. Зависимость  $Re \omega_1$  от положения стержня АР, поддерживающего ток центрального ДАР и работающего совместно с РВР

АР в верхней части активной зоны. Варьирование значений МКР показало, что  $Re \omega_1$  к величине  $\alpha_{л}$  чувствительнее, чем к  $\alpha_{и}$ . Если  $\alpha_{л}$  окажется на 30% выше расчетного значения, реактор нельзя будет нормально эксплуатировать без специальной системы стабилизации аксиального поля.

2. АР настроен на поддержание тока ДАР, установленного в нижней части активной зоны (рис. 2, б). В этом случае стержень АР, работающий в верхней части реактора, эффективно стабилизирует поле даже при  $\alpha_{л} = -0,005$ . Если же конец стержня располагается в той же части реактора, где установлен датчик, наблюдается существенная неустойчивость.

3. АР настроен на поддержание тока ДАР, установленного в средней части активной зоны (рис. 2, в). Качественно зависимость АУ реактора от положения стержня аналогична той, что наблюдалась для АР, поддерживающего мощность. Но по мере приближения конца стержня АР к области, в которой установлен ДАР, ухудшается устойчивость следующей моды. Так, при  $\alpha_{л} = -0,005$  и  $H \approx 160 \div 200$  см реактор неустойчив уже на двух модах.

4. АР настроен, как и в п. 3, но работает совместно с РВР-1 или с РВР-2. Схемы размещения стержня и датчика (РВР-1) или укороченного стержня и датчиков (РВР-2) показаны на рис. 3: РВР-1 поддерживает нейтронное поле в месте установки управляющего им датчика, а РВР-2 — относительную разность показаний своих датчиков. Из рис. 3 следует, что при  $\alpha_{л} = -0,005$  оба типа РВР стабилизируют реактор, если конец стержня АР располагается в нижней части активной зоны; ни один из РВР не стабилизирует поля нейтронов, когда конец стержня АР находится в середине активной зоны.

5. АР настроен, как и в п. 1, но работает совместно с РВР-2. В этом случае даже при  $\alpha_{л} = -0,005$  реактор устойчив при любом расположении АР, причем  $\omega_1 \approx -\lambda_1 = -0,11 \text{ ч}^{-1}$ , где  $\lambda_1$  — постоянная времени распада  $^{135}\text{I}$ .

6. АР, как и в п. 2, поддерживает ток ДАР, установленного в нижней части реактора, но работает совместно с РВР-1. Если ход стержня АР ограничен той половиной активной зоны, в которой установлен управляющий им ДАР, то, как и в п. 5, реактор устойчив даже при  $\alpha_{л} = -0,005$ , причем  $\omega_1 \approx -0,11 \text{ ч}^{-1}$ .

Таким образом, стержни АР целесообразно размещать в верхней половине активной зоны ВВЭР-1000; в качестве системы регулирования высотного распределения предпочтительнее система на основе укороченного стержня и ионизационных камер, размещенных выше и ниже середины активной зоны (РВР-2). Одновременное выполнение этих рекомендаций обеспечивает стабилизацию аксиального поля в ВВЭР-1000 даже при самых неблагоприятных значениях мощностных коэффициентов реактивности.

Авторы благодарны А. Н. Новикову, В. Н. Семенову и Ю. А. Крайневу за полезные дискуссии и помощь при определении исходных параметров ВВЭР-1000.

Поступило в Редакцию 1/IX 1977 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Randall D., John D. «Nucleonics», 1958, v. 16, p. 82.
2. Хитчок А. Устойчивость ядерных реакторов. М., Госатомиздат, 1963.
3. Афанасьев А. М., Торлин Б. З. «Атомная энергия», 1977, т. 43, вып. 4, с. 243.
4. Емельянов И. Я., Гаврилов П. А., Селиверстов Б. Н. Управление и безопасность ядерных энергетических реакторов. М., Атомиздат, 1975.