

и  $\text{Hg}^{201}$  флуктуации полных ширин  $\Gamma_\gamma$  необходимо объяснить в зависимости от спина.

Было проведено исследование для железа, где переход с энергией около 6 *Мэв* связан с частичной шириной, флуктуирующей в соответствии с силой резонансов, что позволило определить возможный вклад прямого радиационного захвата в крыльях резонанса при 4,8 *кэв*. Резонансы меди при 648 и 990 *эв* и цинка при 281 и 322 *эв*, для которых  $\Gamma_\gamma \approx \Gamma$ , также являлись объектами исследований.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы надеемся, что к моменту, когда будет установлена третья секция ускорителя, которая увеличит энергию электронов до 45 *Мэв*, и эксперименты возобновятся при более высоких интенсивностях нейтронного пучка, будет получено много данных о зависимости статистических свойств резонансов у средних ядер, расположенных между 5 и 100 *кэв* от спина. В этой области, где разрешение 0,1 *нсек/м* достижимо, установка, используемая в Сакле, может успешно конкурировать с ускорителем Ван де Граафа. С другой стороны, интенсивное развитие исследований частичных радиационных ширин, проводимых с более высокой интенсивностью или разрешением, должно привести к уточнению имеющихся результатов.

Поступила в Редакцию 13/1 1965 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. R. Bergere. Neutron time-of-flight methods. Publié par Euratom. Bruxelles, 1961, p. 329.

2. H. Leboutet et al. *Onde électrique*, 37, 358, 28 (1957).
3. Rapports intérieurs EANDC, 1963—1964.
4. J. Julien. Neutron time-of-flight methods. Publié par Euratom. Bruxelles, 1961, p. 139; C. Corge et al. *J. Phys.*, 22, 724 (1961).
5. C. Corge et al. *C. R. Acad. Sci.*, 253, 859 (1961).
6. J. Julien et al. *Phys. Letters*, 3, 2, 67 (1962).
7. J. Morgenstern et al. *Nucl. Phys.* (в печати).
8. J. Morgenstern et al. (в печати).
9. J. Thenard, G. Victor. *Nucl. Instrum. and Methods*, 26, 45 (1964).
10. C. Bostrom, J. Draper. *Rev. Sci. Instrum.*, 32, 1024 (1961).
11. J. Julien et al. *C. R. Acad. Sci.*, 254, 4162 (1962).
12. G. Bianchi, C. Corge. *Rapport C. E. A. n° 2346* (1963); *Rapport C. E. A.* (в печати).
13. H. Landon, E. Rae. *Phys. Rev.*, 107, 1333 (1957).
14. V. Huynh et al. *C. R. Acad. Sci.*, 248, 2330 (1959).
15. C. Corge et al. *C. R. Acad. Sci.*, 249, 413 (1959).
16. J. Julien et al. *J. Phys.*, 21, 423 (1960).
17. G. Bianchi et al. *J. Phys.*, 24, 994 (1963).
18. G. Bianchi et al. *J. Phys.*, 24, 997 (1963).
19. G. Bianchi et al. *J. Phys.*, 24, 999 (1963).
20. M. Vastel. *Thèse de 3e cycle*. Orsay, 1963.
21. J. Julien et al. *Nucl. Phys.* (в печати).
22. J. Julien et al. *Congrès International de Physique Nucléaire*, Paris, Juillet, 1964.
23. J. Julien. *C. R. Acad. Sci.*, 252, 3233 (1961).
24. J. Julien. *Phys. Letters*, 10, 86 (1964).
25. J. Julien. *Nucl. Phys.* (в печати).
26. F. Firk et al. *Proc. Phys. Soc.*, 82, 477 (1963).
27. C. Porter, R. Thomas. *Phys. Rev.*, 104, 483 (1956).
28. L. Bollinger et al. *Congrès International de Physique Nucléaire*. Paris, Juillet, 1964.
29. P. Singh. (Частное сообщение).
30. K. Seth et al. *Phys. Letters*, 13, 70 (1964).
31. A. G. W. Cameron. *Canad. J. Phys.*, 37, 322 (1959).
32. C. Corge et al. *J. Phys.*, 22, 722 (1961).



УДК 621.039.520.22

## Эффективность гетерогенных поглотителей в гомогенных уран-водных реакторах

Г. М. Владыков, Б. Г. Дубовский, А. В. Камаев, В. Я. Свириденко,  
Ф. М. Кузнецов, Г. А. Попов, Ю. Д. Паламарчук

Приводятся результаты экспериментов по определению эффективности поглотителей в гомогенных уран-водных реакторах. Изучена эффективность одного и группы цилиндрических стержней из карбида бора и вадмия в зависимости от размеров поглотителей и концентрации урана в активной зоне. Показано влияние стальных оболочек на эффективность стержней.

Проведено сравнение результатов двухгруппового расчета эффективности центрального стержня из карбида бора с экспериментальными данными.

Для обеспечения ядерной безопасности при переработке делящихся веществ широко используются гетерогенные поглотители нейтронов. В настоящей работе рассматривается влияние поглотителей на величину критической массы гомогенных уран-водных реакторов. Эксперименты проводились на реакторах без отражателя и реакторах с боковым и нижним

водяными отражателями толщиной по 25 см. Активной зоной реакторов служил водный раствор соли урана  $UO_2(NO_3)_2$ , который заливали в цилиндрические баки из нержавеющей стали 1Х18Н9Т (толщина стенок бака 1,5 мм).

В экспериментах, проведенных на реакторах без отражателя, минимальное расстояние активной зоны от стен, пола и окружающих предметов составляло не менее 2 м. Эксперименты проводились с растворами урана (обогащение 90%). Поглощающие стержни состояли из порошка карбида бора с насыпным весом  $1,25 \text{ г/см}^3$ , помещенным в цилиндрические чехлы из нержавеющей стали, или из заполненных водой кадмиевых труб с толщиной стенки 0,5 мм, также помещенных в чехлы из нержавеющей стали.

### Методика измерений

При рассмотрении ядерной безопасности эффективность поглотителей удобно оценивать по изменению критического объема (критической массы или критической высоты) при введении поглотителей в активную зону реактора. В настоящей работе эффективность поглотителей выражена в виде разности критических объемов и критических высот реакторов с поглотителем и без него.

Эффективность поглощающих стержней и вставок определялась в реакторе с активной зоной диаметром 400 мм. В активную зону критического реактора высотой  $H$  вводился поглощающий стержень. Вследствие вытеснения части раствора поглотителем поднимался уровень раствора. Путем добавления раствора реактор снова доводился до критического состояния с высотой активной зоны  $H_{ст}$  ( $H$  и  $H_{ст}$  — критическая высота реактора без стержня и с поглощающим стержнем соответственно). Погрешность в определении критической высоты составляла  $\pm 1,5\%$ . Химический анализ растворов урана проводился осаждением диурата аммония [1]. Концентрация урана в растворе определялась с ошибкой  $\pm 1\%$ . В экспериментах использовались растворы с концентрацией урана  $C$ , равной 38; 72 и 286 г/л.

Для нахождения эффективности поглотителей в единицах реактивности определялась скорость изменения реактивности при изменении критической высоты активной зоны. Различные значения критической высоты достигались изменением диаметра активной зоны. Эксперименты проводились для раствора с концентрацией урана 72 г/л. В баке активной

зоны достигался критический объем раствора. Для создания надкритического состояния в критический реактор доливались небольшие порции раствора урана, после чего измерялись установившиеся периоды надкритических реакторов. Затем для каждой высоты активной зоны по формуле обратных часов с учетом ценности запаздывающих нейтронов вычислялись значения реактивности  $\Delta\rho$  при увеличении высоты активной зоны на величину  $\Delta h$ . Ценность запаздывающих нейтронов учитывалась коэффициентами, выражавшими для каждой группы запаздывающих нейтронов отношение утечки запаздывающих и мгновенных нейтронов. По одногрупповой диффузионной теории, согласно работе [2],

$$\frac{\partial \rho}{\partial h} = \frac{2\pi^2 M^2}{k_\infty} \cdot \frac{1}{(H+2\lambda)^3}, \quad (1)$$

где  $\rho$  — реактивность в единицах  $10^{-5}$ ;  $M^2$  — площадь миграции нейтронов в бесконечной системе;  $k_\infty$  — коэффициент размножения нейтронов в бесконечной системе;  $\lambda$  — длина экстраполяции, см. После добавления раствора в критический реактор полная реактивность составляет

$$\rho = \frac{2\pi^2 M^2}{k_\infty} \int_{H_{над}}^H \frac{dh}{(h+2\lambda)^3} \quad (2)$$

или

$$\rho = \frac{\pi^2 M^2}{k_\infty} \left[ \frac{1}{(H+2\lambda)^2} - \frac{1}{(H_{над}+2\lambda)^2} \right], \quad (3)$$

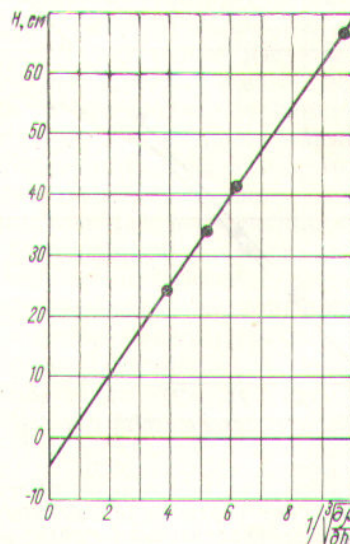


Рис. 1. Экспериментальная зависимость  $\partial\rho/\partial h$  от критической высоты  $H$  реактора.

где  $H_{\text{над}}$  — высота активной зоны надкритического реактора, который становится критическим при введении поглощающего стержня в активную зону. При использовании выражения (1) получим

$$Q = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial Q}{\partial h} \right) (H + 2\lambda)^3 \times \left[ \frac{1}{(H + 2\lambda)^2} - \frac{1}{(H_{\text{над}} + 2\lambda)^2} \right]. \quad (4)$$

Экспериментальные значения  $\partial Q / \partial h$  и  $H$  обрабатывались методом наименьших квадратов; затем на основании полученных результатов была построена зависимость  $H$  от  $1/\sqrt{\partial Q / \partial h}$  (рис. 1). Из этой зависимости были определены значения  $\frac{\partial Q}{\partial h} \cdot (H + 2\lambda) = 336 \pm 16$  и  $2\lambda = 5,4 \pm 0,2$  см.

### Эффективность центрального поглощающего стержня

Результаты экспериментов и расчетов по определению эффективности центрального поглощающего стержня показаны на рис. 2—6. Соответствующие расчеты приращения критической высоты  $\Delta H = H_{\text{ст}} - H$  были проведены для реактора без отражателя. Критические размеры реактора со стержнем и без него определялись решением системы двухгрупповых

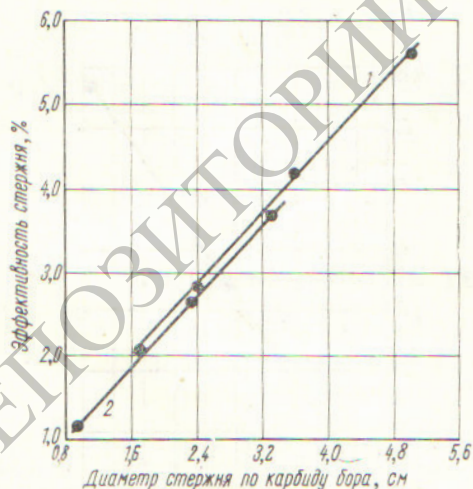


Рис. 2. Зависимость эффективности поглощающего стержня из карбида бора от его диаметра в цилиндрическом реакторе без отражателя (диаметр активной зоны  $d = 400$  мм; концентрация урана в растворе  $C = 72$  г/л);

1, 2 — стержни со стальной оболочкой толщиной 4 и 0,3 мм соответственно.

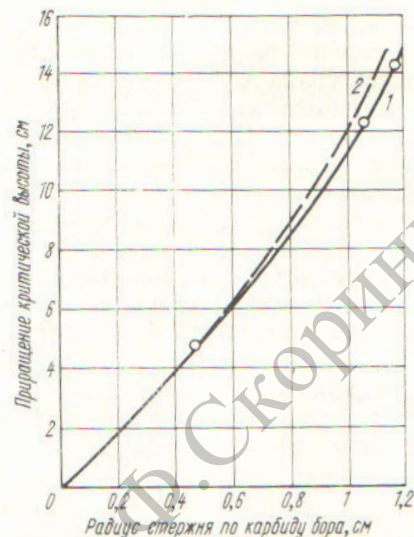


Рис. 3. Зависимость эффективности центрального поглощающего стержня из карбида бора от его радиуса в цилиндрическом реакторе без отражателя ( $d = 400$  мм;  $C = 38$  г/л;  $H = 41,3$  см);

1 — эксперимент, стержни с оболочкой толщиной 0,3—0,5 мм; 2 — расчет без учета оболочки.

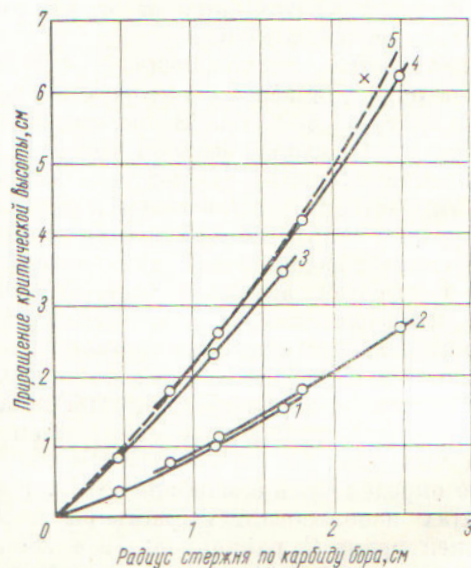


Рис. 4. Эффективность центрального поглощающего стержня из карбида бора в зависимости от его радиуса (реактор без отражателя;  $d = 400$  мм;  $H = 24,3$  см при  $C = 72$  г/л;  $H = 19,2$  см при  $C = 286$  г/л);

1, 2 — эксперимент, стержни с оболочкой толщиной 0,3—0,5 и 4 мм соответственно; 3, 4 — эксперимент стержни с оболочкой толщиной 0,3—0,5 и 4 мм соответственно ( $C = 72$  г/л); 5 — расчет без учета оболочки ( $C = 72$  г/л) × — расчет с учетом оболочки ( $C = 72$  г/л).

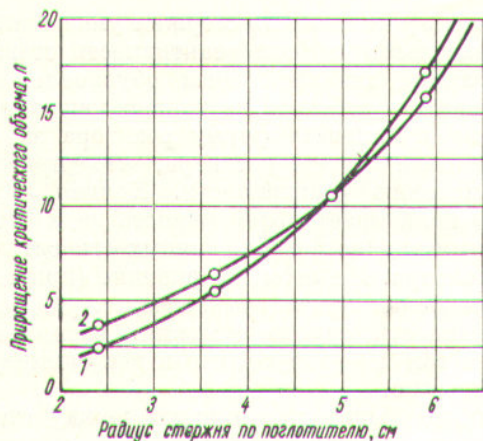


Рис. 5. Эффективность стержней из карбида бора и кадмиевых стержней с водой в зависимости от радиуса стержня по поглотителю (реактор без отражателя;  $d = 400$  мм;  $C = 136$  г/л; критический объем реактора без стержня 25,6 л):

1 — стержни в виде кадмиевой трубы, заполненной водой (толщина кадмия 0,5 мм, толщина стальной оболочки 1 мм);  
2 — стержни из карбида бора (толщина стальной оболочки 1 мм).

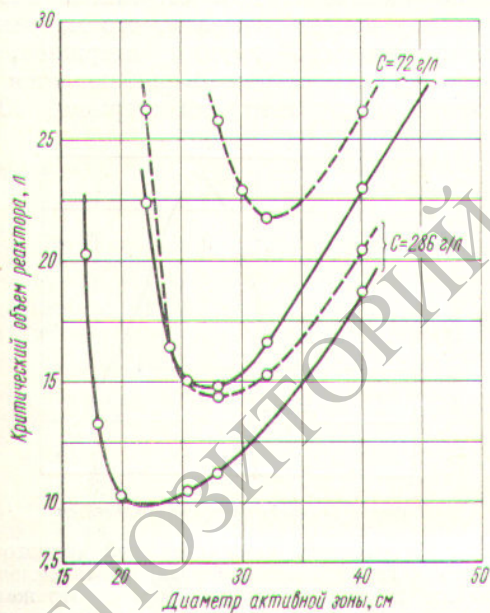


Рис. 6. Критические объемы цилиндрических реакторов с поглощающим стержнем (---) и без стержня (—) в зависимости от диаметра активной зоны (реакторы с отражателем; диаметр поглощающего стержня по карбиду бора 50 мм; толщина стальной оболочки 4 мм).

уравнений реактора; решалась радиальная задача для цилиндрического реактора с эквивалентными высотами  $H_3 = H + 2\lambda$  (для реак-

тора без стержня) и  $H_3^{ст} = H_{ст} + 2\lambda$  (для реактора со стержнем). Предполагалось, что при введении поглощающего стержня длина экстраполяции  $\lambda$  не изменяется и, следовательно,  $\Delta H = H_3^{ст} - H_3$ . Стальной бак реактора и стальная оболочка стержней в расчетах не учитывались. Граничные условия на поверхности стержня записывались в соответствии с работой [3]. Рассеяние нейтронов в стержне учитывалось в рамках теории первого соударения. Эффективные сечения захвата, деления, а также коэффициент диффузии и величина  $1/\gamma(u)$ , характеризующая «серость» стержня при летаргии  $u$ , для надтепловых нейтронов усреднялись по спектру в десятигрупповом диффузионном приближении для сферического реактора без отражателя [4]. Чтобы оценить влияние стальной оболочки, был проведен расчет эффективности двухслойного стержня диаметром 45 мм по карбиду бора и толщиной стальной оболочки 4 мм с учетом многократного рассеяния нейтронов в стержне по методике, изложенной в работе [5]. Из рис. 3 и 4 видно, что двухгрупповые расчеты дают несколько завышенные значения эффективности стержней.

При концентрации урана 38 г/л расхождение расчетных и экспериментальных данных составляет 2—9%; при  $C = 72$  г/л расчетные значения эффективности стержней с толщиной оболочки 0,3—0,5 мм на 10% больше экспериментальных значений, а с учетом стальной оболочки расхождение расчетных и экспериментальных данных составляет 11%. Таким образом, двухгрупповые расчеты могут быть использованы для оценки эффективности стержней. Проведенные эксперименты и расчетные данные для стержня диаметром 4,5 см по карбиду бора показали, что при одном и том же размере стержня с уменьшением толщины оболочки его эффективность несколько падает. Стальная оболочка приводит к двум противоположным эффектам: экранирует карбид бора и вытесняет раствор, причем преобладает эффект вытеснения (см. рис. 2 и 4).

Сравнение эффективностей стержней, заполненных порошком карбида бора, и кадмиевых стержней, заполненных водой, приведено на рис. 5. Видно, что при диаметрах до 90 мм более эффективен сплошной стержень с карбидом бора. При увеличении наружного диаметра по поглотителю эффективности стержней становятся равными; при дальнейшем увеличении диаметра более эффективным поглотителем становится кадмиевая труба с водой.



При диаметре стержней  $\sim 100$  мм, что соответствует  $\sim 2\sqrt{\tau_{\text{H}_2\text{O}}}$  (где  $\tau_{\text{H}_2\text{O}}$  — возраст нейтронов), эффективности поглотителей совпадают. Кроме того, была проведена серия экспериментов по определению критических объемов цилиндрических реакторов с центральным поглощающим стержнем и без него в зависимости от диаметра активной зоны. Реакторы имели боковой и нижний торцовый водяные отражатели. Диаметры активной зоны были равны 160—500 мм. Из полученных зависимостей (см. рис. 6) видно, что с уменьшением диаметра активной зоны критические объемы раствора со стержнем и без стержня увеличиваются и при определенных диаметрах становятся бесконечно большими. При меньших диаметрах реактор может быть только подкритическим.

### Эффективность группы поглощающих стержней

На рис. 7 показана эффективность одного и двух стержней в зависимости от их расположения в активной зоне реактора. Кривая 1 соответствует экспериментальному определению эффективности одного стержня при его перемещении от центра активной зоны к периферии.

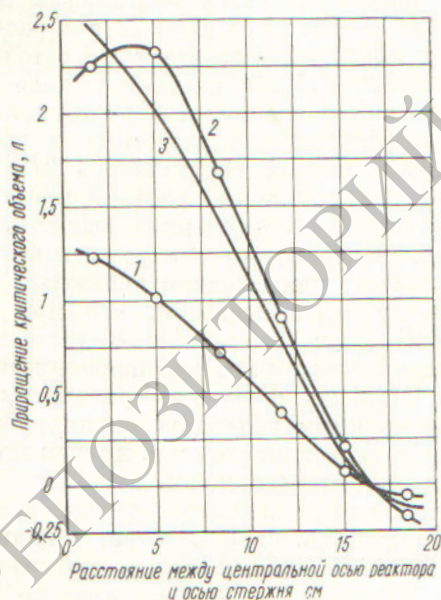


Рис. 7. Эффективность одного и двух поглощающих стержней в зависимости от их расположения по радиусу активной зоны (реактор без отражателя;  $d = 400$  мм;  $C = 286$  г/л; диаметр стержня по карбиду бора 24 мм; толщина оболочки 4 мм):

1 — один стержень; 2 — два стержня; 3 — удвоенная эффективность одного стержня.

При этом эффективность стержня уменьшается. Положительный эффект реактивности стержня на границе активной зоны обусловлен тем, что стержень работает не только как отражатель, но и изменяет форму реактора за счет перемещения части раствора, что приводит к увеличению реактивности. Кривая 2 (см. рис. 7) показывает эффективность двух стержней, симметрично расположенных относительно оси реактора. На этом же рисунке (кривая 3) для сравнения приведены значения удвоенной эффективности одного стержня, расположенного на том же радиусе, что и два симметричных стержня.

При небольших расстояниях между стержнями интерференция отрицательна, в остальных случаях — положительна. Максимум интерференции наблюдается при расстояниях между стержнями около 10 см. Аналогичный эффект наблюдается при измерении эффективности семи стержней (рис. 8). Измерения проводились при неподвижном центральном стержне и одновременном перемещении шести симметрично расположенных стержней. Результаты экспериментов показали, что максимальная эффективность группы стержней, как и в случае двух стержней, наблюдается при расстоянии между центрами стержней 10 см.

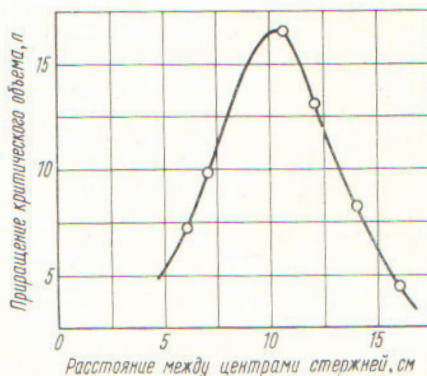


Рис. 8. Эффективность семи стержней (одного центрального и шести эксцентричных) в зависимости от расстояния между ними (реактор с отражателем;  $d = 400$  мм;  $C = 286$  г/л; диаметр стержня по карбиду бора 50 мм; толщина стальной оболочки 4 мм).

Измерялась также эффективность группы стержней, симметрично расположенных на окружности с радиусом, составляющим приблизительно 0,5 радиуса активной зоны (за исключением группы из четырех стержней, когда один стержень находился в центре активной зоны). Результаты экспериментов при-

ведены в табл. 1. При диаметре активной зоны 400 мм с введением шести стержней критиче-

Таблица 1

Эффективность группы стержней, симметрично расположенных на окружности диаметром 192 мм

Число стержней . . . . .	2	3	4	6
Приращение критического объема, л (концентрация урана 72 г/л) . . . .	3,0	9,4	17,8	91,9
Приращение критического объема, л (концентрация урана 286 г/л) . . . .	2,2	2,6	5,6	11,3

Примечание. Реактор с отражателем;  $d=400$  мм; диаметр стержней по карбиду бора 50 мм; толщина стальной оболочки 4 мм.

Таблица 3

Эффективность регулярных решеток стержней в зависимости от числа стержней

Шаг решетки, мм . . . . .	60				40			
Число стержней . . . . .	6	18	1	6	7	18	36	
Приращение критического объема, л . . . .	3,40	15,10	0,80	3,40	3,50	18,90	58,90	

Примечание. Реактор с отражателем;  $d=320$  мм; концентрация урана 286 г/л; критический объем реактора без отражателя 13,1 л; диаметр стержней по карбиду бора 17 мм; толщина стальной оболочки 4 мм.

Таблица 2

Эффективность регулярных решеток и стержней в зависимости от числа стержней

Шаг решетки, мм . . . . .	Диаметр стержней по карбиду бора 17 мм; толщина стальной оболочки 4 мм					Диаметр стержней по карбиду бора 12 мм; толщина стальной оболочки 4 мм					
	7	12	13	18	36	6	7	18	36	6	18
Приращение критического объема, л . . . . .	2,73	4,45	5,23	8,05	17,9	2,18	2,20	7,00	24,75	1,48	4,55

Примечание. Реактор с отражателем;  $d=400$  мм; концентрация урана 286 г/л; критический объем реактора без стержней 18,2 л.

ский объем реактора увеличивается на 65% и выше в зависимости от концентрации урана в растворе.

В табл. 2 и 3 приводятся результаты экспериментов при заполнении активной зоны стержнями от центра к периферии. При этом получается двухзонный реактор с центральной зоной, равномерно заполненной стержнями, и периферийной кольцевой зоной без стержней. При увеличении числа стержней менялось соотношение объемов этих зон. Эксперименты показали, что использование группы стержней приводит к значительному увеличению критического объема и может быть рекомендовано

для обеспечения ядерной безопасности технологических аппаратов.

Поступила в Редакцию 20/VII 1964 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. К. Марков. Уран, методы его определения. М., Атомиздат, 1960.
2. Красик, Радковский. В кн. «Труды Второй Международной конференции по мирному использованию атомной энергии. (Женева, 1955)». Т. 5. М., Изд-во АН СССР, 1958, стр. 248.
3. Г. И. Марчук. Методы расчета ядерных реакторов. М., Госатомиздат, 1961.
4. А. И. Новожиллов, С. Б. Шихов. «Атомная энергия», 8, 209 (1960).
5. Е. И. Гришанин. «Атомная энергия», 16, 234 (1964).