



НИИАР П-204

Научно-исследовательский институт
атомных реакторов им. В.И. Ленина

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЙ ОТДЕЛ

С.Н. Вотинов, В.И. Прохоров, А.Н. Колесников

К ОЦЕНКЕ РАДИАЦИОННОЙ
ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ЖЕЛЕЗА, НИОБИЯ
И МОЛИБДЕНА ПРИ НЕЙТРОННОМ
ОБЛУЧЕНИИ В РЕАКТОРАХ СМ-2 И БОР-60

635

Димитровград • 1973

С.Н.Вотинов, В.И.Прохоров,
А.Н.Холесников

НИИАР П-204
УДК 669.14.018.8

К оценке радиационной повреждаемости железа, ниобия
и молибдена при нейтронном облучении в реакторах СМ-2 и БОР-60

Используя Полу-Нельсоновскую модель ($N/2$) радиационной повреждаемости железа, произведен расчет сечений и скоростей атомных смещений для железа, ниобия и молибдена в реакторах СМ-2 и БОР-60.

Препринт Научно-исследовательского института атомных реакторов
им. В.И.Ленина, Дзмитровград, 1973

S.N.Votinov, V.I.Prochorov,
A.N.Kolesnikov

SRIAR P-204
UDC 669.14.018.8

On the Estimation of Fe, Ni and Mo Radiation Damage
under Neutron Irradiation in the Reactors SM-2 and
BOR-60

Using the half-Nelson model ($N/2$) of Fe radiation damage the cross-sections and the rates of atom displacements have been calculated for iron, niobium and molybdenum in the reactors SM-2 and BOR-60.

Preprint. Scientific Research Institute of Atomic Reactors
Named after V.I.Lenin, Dimitrovgrad, 1973

Научно-исследовательский институт
атомных реакторов
им. В.И.Ленина

НИИАР П-204

С.Н.Вотинков, В.И.Прохоров, А.Н.Колесников

К ОЦЕНКЕ РАДИАЦИОННОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ЖЕЛЕЗА,
НИОБИЯ И МОЛИБДЕНА ПРИ НЕЙТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ
В РЕАКТОРАХ СМ-2 И БОР-60

Дмитровград
1973

Р е ф е р а т

На основании анализа существующих теоретических моделей радиационной повреждаемости твердых тел в качестве расчетной выбрана так называемая Полу-Нельсоновская ($N/2$) модель. Представлены величины сечений и скоростей атомных смещений железа, ниобия и молибдена для различных позиций реакторов СМ-2 и БОР-60. Проведено сравнение различных критериев оценки величины радиационной повреждаемости и даны таблицы пересчета от используемых дозных параметров к числу "атомных смещений на атом". Сделан вывод о возможности изучения некоторых эффектов облучения быстрыми нейтронами, характерных для реакторов типа БОР-60, по результатам облучения в реакторе СМ-2.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современные проблемы реакторного материаловедения конструкционных материалов, радиационное охрупчивание и набухание, над решением которых работают во многих странах, требуют единого подхода к оценке величины повреждаемости, вызываемой нейтронным облучением. Если первый эффект становится заметным уже при малых дозах облучения, сравнительно быстро набираемых при реакторном облучении, то для появления второго в наиболее используемых конструкционных материалах требуются экспозиции более года. По этой причине невозможно создать достаточно верную модель набухания и представить его величину и морфологию в виде аналитических функций от дозы, температуры облучения и нейтронного потока на основании только реакторных экспериментов.

Предпринятые попытки аппроксимации начальной стадии набухания на область больших доз ($\Phi > 1,5-2,0 \times 10^{23}$ нейтр/см²; $E \geq 0,1$ Мэв) не учитывают эффекта насыщения и дают сомнительные результаты [1,2]. Это вызвало необходимость использования ускорителей для получения степени повреждаемости, недостижимой при облучении в реакторе. Получен ряд очень ценных экспериментальных результатов, позволяющих делать прогнозы поведения конструкционных материалов в быстрых реакторах [3,4].

Однако результаты экспериментов по облучению на ускорителе трудно сравнивать с реакторным облучением по сте -

пени повреждаемости, так как потери энергии первично возбужденного атома на электронах, которую невозможно точно учесть, свойство второго, но не первого типа облучения.

Для достоверности сравнения необходима модель радиационной повреждаемости, которая может быть применена как к реакторному облучению, так и к облучению на ускорителе.

В настоящее время реакторное облучение анализируется либо с точки зрения моделей Кинчина-Лиза [3] и Келли [4], либо эмпирических параметров, характеризующих дозу облучения (например, доза нейтронов с энергией больше 0,1; 0,85; 1 Мэв). Ни один из этих параметров не дает точной оценки повреждаемости. Что касается моделей Кинчина-Лиза и Келли, то уже давно отмечалось, что они значительно переоценивают число производимых атомных смещений. Более новая модель Смак-Ляда [7], хотя и дает величину смещений на 20% меньше по сравнению с Кинчином-Лизом, также содержит ряд грубых упрощений. Более логичной и последовательной является модель Нельсона, Иферингтона и Смита, так называемая модель $(N/2)$ [8]. Авторы обобщили современные достижения радиационной физики твердого тела, более того, их модель может быть существенно улучшена при дальнейшем прогрессе теории.

По модели $(N/2)$ можно рассчитывать повреждаемость как при реакторном облучении, так и при облучении на ускорителе. Кроме того, нельзя не отметить, что надежность модели еще более увеличится при использовании ее в качестве единого стандарта для оценки числа атомных смещений.

На основании выше сказанного в качестве рабочей модели оценки радиационной повреждаемости была выбрана модель $(N/2)$.

2. ПОЛУ-НЕЛЬСОНОВСКАЯ МОДЕЛЬ

В результате наложения ограничений на модель Кинчина-

Лиза Нельсон предложила следующее выражение для полного числа смещений, производимых первично выбитым атомом энергии E_p :

$$N_d(E_p) = \frac{d \cdot S(E_p) W(E_p) E_p}{\gamma(E_p) E_f}, \quad (I)$$

где

d - константа $\sim 0,75$, которая вводится с целью приближения модели летящих шаров к реальному удару;

$S(E_p)$ - зависящий от энергии параметр, вводимый для учета взаимной рекомбинации в каскаде, до получения надежных результатов берется равным единице;

$W(E_p)$ - часть начальной энергии первично выбитого атома, которая рассеивается в каскаде на неупругие удары;

$\gamma(E_p)$ - параметр, учитывающий каналирование;

E_f - средняя фокусирующая энергия, взятая для железа 30 эв .

Для железа функция $W(E_p)$ показана на рис. 1.

Наибольшую трудность в определении $N_d(E_p)$ представляет выбор функции $\gamma(E_p)$. Нельсон использовала экстраполированные к большим энергиям значения, рассчитанные Билером и Беско. Из-за ограниченности расчетной модели с учетом особенностей модели ($N/2$) Нельсон ввел новую функцию $\gamma^*(E_p)$, произвольно уменьшающуюся от значений Билера и Беско до значений по Вилчичу-Лизу [$\gamma(E_p) = 2$]. Функция $\gamma^*(E_p)$ для железа показана на рис. 2.

При облучении на ускорителе спектр энергий первично выбитых атомов задается хорошо известным законом рассеяния

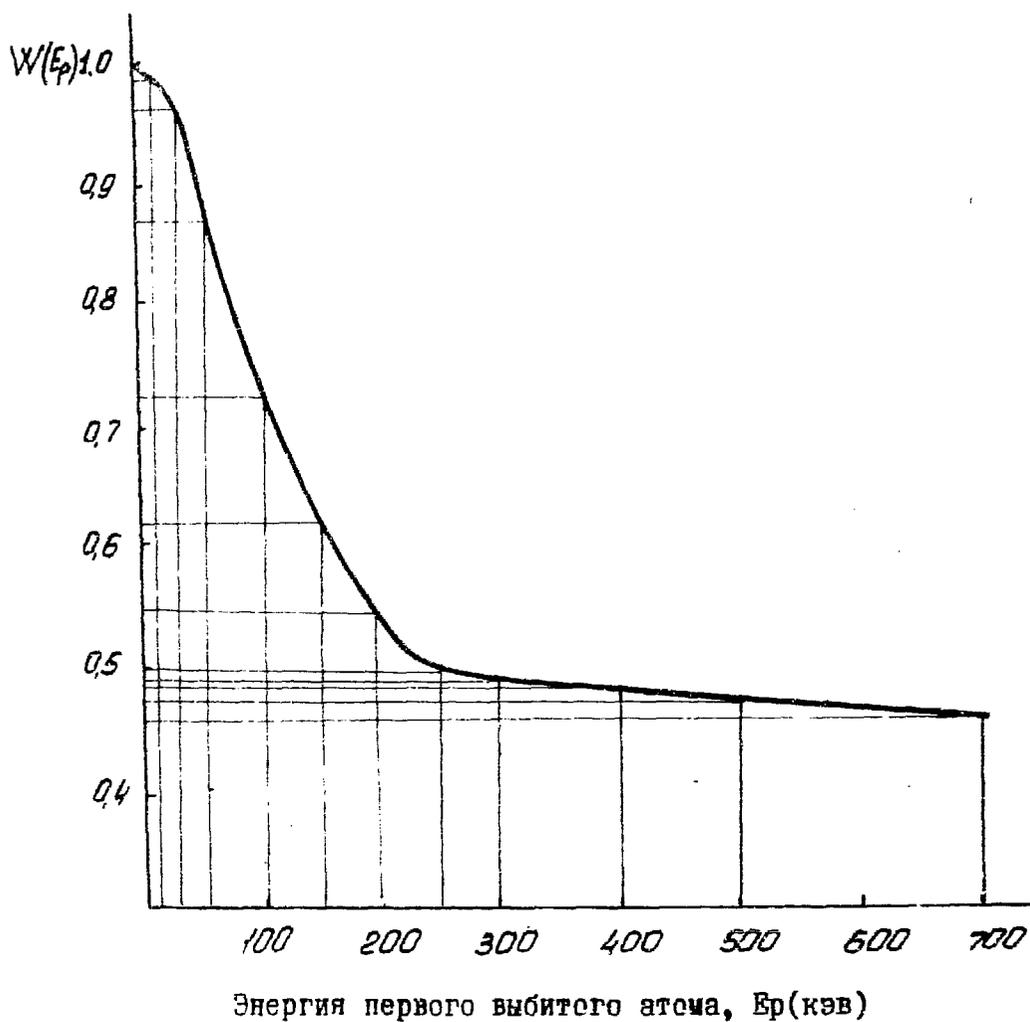
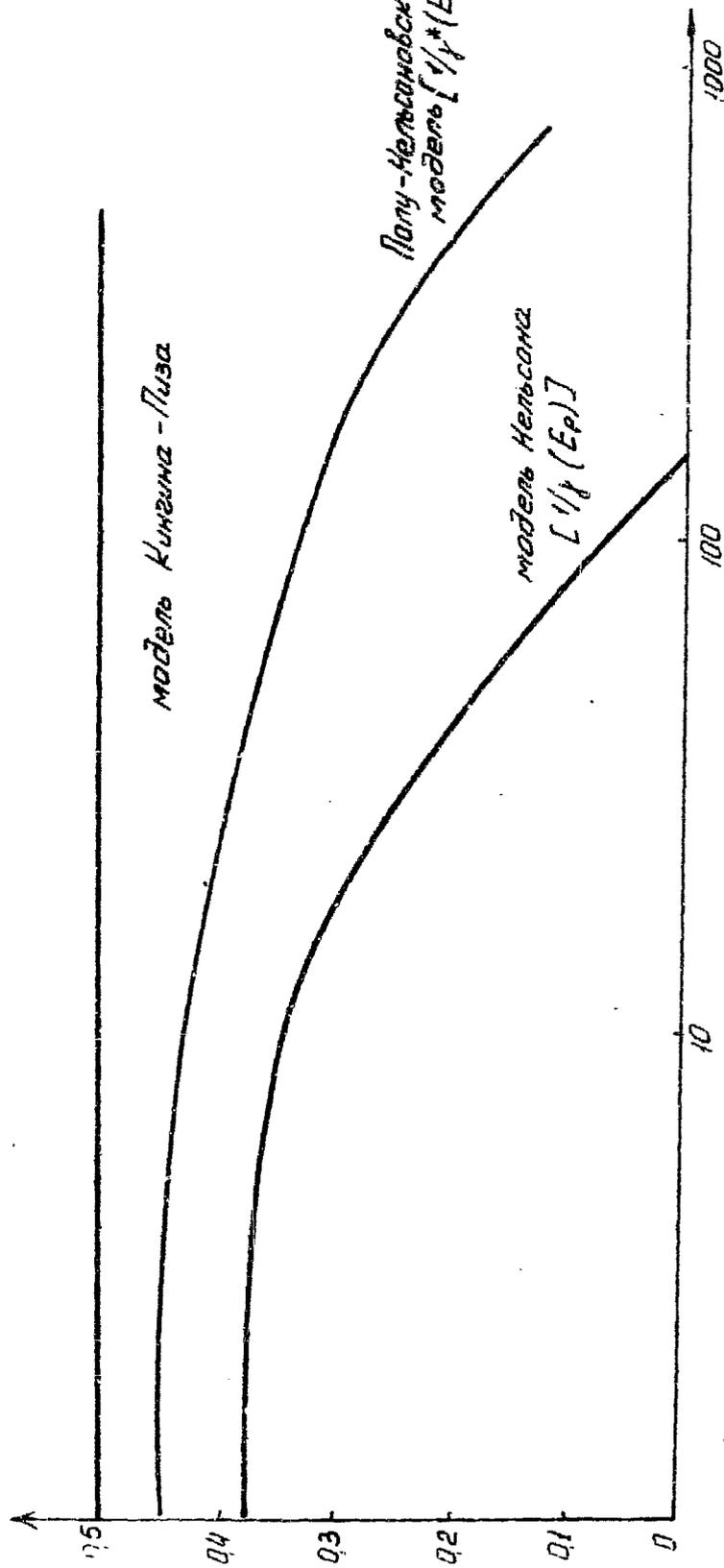


Рис. I. Часть энергии первично выбитого атома, теряемая на производство смещений

$$1/\gamma^*(E_p) : 1/\gamma(E_p)$$



Энергия первичного возбужденного атома, E_p (кэВ)

Рис. 2. Функция канализирования $\gamma(E_p)$ для моделей (N) и (N/2)

Резерфорда. Резерфордовское рассеяние образует первично выбитые атомы преимущественно с очень низкой энергией, обычно меньше 1 кэв. При этом типе облучения параметры α и $W(E_p)$ уравнения (1) с хорошим приближением равны единице и $1/\gamma^* \approx 0,45$, т.е. своим значениям при $E_p = 0$. Таким образом, при $E_p < 1$ кэв

$$n_{\alpha}(E_p) = \frac{0,45}{E_f} E_p. \quad (2)$$

3. РАСЧЕТ СЕЧЕНИЙ АТОМНЫХ СМЕЩЕНИЙ

Описанная выше модель является основой для нахождения сечений атомных смещений. При расчете предполагается малым влияние анизотропного рассеяния, неупругого рассеяния и поглощения нейтронов.

В случае изотропного рассеяния вероятность того, что нейтрон энергии E произведет первично выбитый атом энергией E_p в интервале dE_p , есть $dE_p/\mu E$ в диапазоне энергий от 0 до μE и равна 0 вне этого интервала. Константа μ зависит от атомного номера рассеивающего ядра A и $\mu = 4A/(1+A)^2$. Для железа $\mu_{Fe} = 0,069$; ниобия $\mu_{Nb} = 0,043$; молибдена $\mu_{Mo} = 0,0413$. Среднее число смещений, производимых нейтроном энергии E , равно

$$n_{\alpha}(E) = \int_0^{\mu E} \frac{n_{\alpha}(E_p) dE_p}{\mu E}. \quad (3)$$

Используя уравнение (1), значения $W(E_p)$ из рис. 1 и $1/\gamma^*(E_p)$ из рис. 2, рассчитывается $n_{\alpha}(E_p)$, а затем из уравнения (3) - значения $n_{\alpha}(E)$ в интервале энергий от 1 кэв до 10,5 Мэв.

Для любой энергетической группы нейтронов сечение атомного смещения задается формулой

$$\sigma_{d.g} = \frac{\int \sigma_{el}(E) n_{\alpha}(E) \phi(E) dE}{\int \phi(E) dE}. \quad (4)$$

Сечение смещения имеет размерность атом⁻¹сек⁻¹поток⁻¹ или (длина)². Оно может быть выражено в барнах (10⁻²⁴см²) и использовано так же, как и др. сечения.

Для получения скорости атомных смещений N' , атом⁻¹сек⁻¹, необходимо перемножить по группам сечения смещения и нейтронные потоки и просуммировать:

$$N' = \sum_1^{g \max} \sigma_{d.g} \times \phi g. \quad (5)$$

Умножением скорости атомных смещений на эффективное время в секундах определяется широко используемый параметр — число атомных смещений на атомⁿ.

В расчете использовались сечения упругого рассеяния в 26 группах для железа, вольфрама и молибдена из работы [9].

Величины $n_{\alpha}(E)$ и $\sigma_{d.g}$ определялись графическим интегрированием уравнений (3) и (4) соответственно с использованием усредненных по группам значений

$\sigma_{el}(E)$ и $\phi(E)$.

Рассчитанные сечения смещения в 26 группах представлены в табл. I.

Приближения о малом влиянии анизотропии, неупругого рассеяния и захвата нейтронов основаны на следующих предположениях:

• анизотропное рассеяние и неупругие эффекты рассеяния в железе становятся достаточными заметными при энергиях нейтронов $E > 1$ Мэв. Вилли [9] показал, что эти явления обладают противоположным действием и почти взаимоничтожаются;

. вероятность захвата нейтрона много меньше вероятности упругого рассеяния; число смещений, производимых составным ядром или вторичными γ квантами, равно соответственно 2 и 0,005% от числа смещений из-за упругого рассеяния нейтронов.

Таблица I

Сечения смещения для железа, ниобия и молибдена, рассчитанные по Полу-Нельсоновской модели

Номер нейтронной группы	Нижняя энергетическая граница группы, кэВ	Сечения смещения, барн		
		Fe	Nb	Mo
I	6500	1528	1065	1030
2	4000	1629	820	784
3	2500	1291	863	685
4	1400	1008	1062	1005
5	800	670	990	903
6	400	585	810	720
7	200	295	547	523
8	100	190	284	276
9	46,5	115	112	106
10	21,5	150	48	47
11	10,0	15	9,0	8,7
12	4,65	30	1,8	1,7
13	2,15	8	мало	мало
13-26	тепловые	мало	-	-

4. ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 2 представлен процентный вклад различных энергетических групп нейтронов в скорость атомных смещений железа для каналов реактора СМ-2. Скорость смещения максимальна для нейтронов с энергией 1,4–2,5 Мэв. Доля разных групп слабо меняется от канала к каналу. Возможно, это объясняется тем, что каналы находятся в бериллиевом отражателе, и нейтронный спектр смягчается равномерно от канала к каналу.

Та же характеристика для ячеек реактора БОР-60 дана в табл. 3. В активной зоне (до 21,8 см) скорость смещения максимальна для нейтронов с энергией 1,4–2,5 Мэв, а в боковом экране — 0,4–0,8 Мэв.

Изменение вклада с расстоянием от центра активной зоны резко отлично для активной зоны и бокового экрана.

Результаты расчета скорости атомных смещений для железа, ниобия и молибдена в центральной плоскости реакторов СМ-2 и БОР-60 представлены в табл. 4 и табл. 5–6 соответственно. Для каналов 2,3,4,5, ДЭК реактора СМ-2 они одного порядка величины со значениями в последних ячейках бокового экрана реактора БОР-60.

При равной степени повреждаемости вследствие облучения в этих реакторах возможны значительные различия по отношению к другим радиационным эффектам, например, трансмутация гелия, так как сечение реакции $Ni^{59}(n,d)Fe^{56}$ в быстром спектре $\sim 4,5$ миллибарн [11], а в быстром спектре в присутствии тепловых нейтронов сечение реакции

$$Ni^{59}(n,\gamma)Ni^{60} + Ni^{59}(n,d)Fe^{56} \sim 7,38 \text{ барн. [12]}$$

Таблица 2

Процентный вклад различных энергетических групп нейтронов в скорость атомных смещений железа для позиций реактора СМ-2

Номер группы	Энергетические границы групп, кэв		Процентный вклад нейтронных групп в скорость атомных смещений, %						
	верхняя	нижняя	К а н а л ы						
			2-3	4-5	ДЭК	БКС	6	7	активная зона
I	10500	6500	1,3	1,3	1,3	1,4	1,8	1,7	2,02
2	6500	4000	7,2	7,3	7,2	6,9	7,3	7,3	11,9
3	4000	2500	9,4	9,9	9,4	7,0	5,4	5,4	20,3
4	2500	1400	28,0	27,8	27,8	30,3	30,6	30,8	26,5
5	1400	800	17,8	17,7	17,7	17,8	18,7	18,4	16,0
6	800	400	17,8	17,8	17,6	17,5	17,6	17,4	13,8
7	400	200	8,2	8,1	8,2	8,3	8,2	8,2	4,8
8	200	100	4,2	4,1	4,2	4,3	4,3	4,3	2,24
9	100	46,5	2,4	2,3	2,4	2,5	2,5	2,5	1,16
10	46,5	21,5	2,8	2,8	2,7	3,0	3,0	3,0	1,24
11	21,5	10,0	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,11
12	10,0	4,65	0,5	0,5	0,4	0,6	0,6	0,6	0
13	4,65	2,15	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	-
14-26	2,15	ТЕПЛОВЫЕ	0	0	0	0	0	0	-

Таблица 3

Процентный вклад различных энергетических групп нейтронов в скорость атомных смещений железа для позиций реактора БОР-60

Номер группы	Энергетические границы групп, кэВ		Процентный вклад нейтронных групп в скорость атомных смещений, %					
			расстояние от центра активной зоны					
	верхняя	нижняя	5,6см	8,8см	21,8см	25,09см	31,68см	38,6см
1	10500	6500	1,5	1,5	1,4	0,7	0,3	-
2	6500	4000	9,6	9,4	7,9	4,6	2,0	1,1
3	4000	2500	19,0	18,8	15,3	9,4	4,5	3,0
4	2500	1400	23,4	23,7	23,8	17,1	10,4	7,6
5	1400	800	16,5	16,5	17,2	17,4	15,5	16,5
6	800	400	15,2	15,3	16,7	28,1	31,0	31,6
7	400	200	7,5	7,5	8,3	10,2	18,6	16,4
8	200	100	4,6	4,6	5,3	7,2	9,4	10,4
9	100	46,5	1,9	1,9	2,5	2,9	4,1	5,7
10	46,5	21,5	0,8	0,8	1,5	2,2	3,8	6,8
11	21,5	10,0	-	-	0,1	0,1	0,2	0,4
12	10,0	4,65	-	-	-	0,1	0,2	0,5
13	4,65	2,15	-	-	-	-	-	-
13-26	2,15	теплов.	-	-	-	-	-	-

Таблица 4

Скорости атомных смещений для железа, ниобия и молибдена в центральной плоскости каналов реактора СМ-2 при полной загрузке активной зоны

Скорость атомных смещений, атом ⁻¹ /секх10 ⁶							
Канал	2-3	4-5	ДЭК	БКС	6	7	АЗ
Fe	0,209	0,254	0,139	0,037	0,0046	0,0073	1,93
Nb	0,240	0,294	0,161	0,0432	0,0054	0,00843	2,03
Mo	0,226	0,274	0,150	0,0407	0,00507	0,00784	1,905

Таблица 5

Скорости атомных смещений для Fe, Nb и Mo, нормированные на поток 10¹⁵ нейтр/см² нейтронов деления, в центральной плоскости реактора БОР-60

Скорость атомных смещений, атом ⁻¹ /секх10 ⁶						
Расстояние от центра АЗ, см	5,6	8,8	21,3	25,09	31,68	38,6
Fe	0,464	0,460	0,421	0,401	0,319	0,213
Nb	0,5185	0,5160	0,482	0,4522	0,429	0,285
Mo	0,479	0,477	0,454	0,4495	0,423	0,228

Однако с учетом особенностей нейтронного спектра реактора СМ-2 (большая доля тепловых нейтронов) возможно его использование для изучения некоторых эффектов облучения, характерных для быстрых реакторов.

Таблица 6

Скорости атомных сечений железа по микрокампаниям реактора БОР-60

Скорость атомных сечений по кампаниям, атом ⁻¹ /секх10 ⁶						
Расстояние от центра активной зоны, см	5,6	8,8	21,8	25,09	31,68	38,6
I-микрокампания	1,100	1,060	0,655	0,535	0,319	0,214
II-микрокампания	1,080	1,040	0,660	0,525	0,314	0,156
III-микрокампания	1,020	0,985	0,635	0,532	0,300	0,151
Момент выработки 94500Мвт-час	1,040	1,010	0,647	0,524	0,323	0,155

В табл. 7 даны коэффициенты кересчета от используемых дозных параметров (число нейтронов деления, нейтронов с $E \geq 0,1$ Мэв; $E \geq 0,8$ Мэв;), нормированных к 10^{22} нейтр/см², к числу "атомных сечений на атом" для позиций реакторов БОР-60 и СМ-2.

Расчетные величины "атомных сечений на атом", получаемых некоторыми конструкционными элементами реакторов СМ-2 и БОР-60 за время службы, представлены в табл. 8. На рис. 3 и рис. 4-5 даны поправочные коэффициенты на высотное распределение для реакторов СМ-2 и БОР-60 соответственно.

Коэффициенты пересчета от дозных параметров в молибдена для реакторов ВОР-60 и СМ-2 при мощности 40

С М - 2				
	Канал	β доляния	$E > 0,1$ Мэв	$E > 0,8$ Мэв
Re	АВ	4,55	7,9	13,4
	4-5	1,71	6,7	15,0
	2-3	1,8	6,8	15,0
	ДЭЖ	0,63	8,2	15,0
	БКС	0,66	6,75	14,9
	7	0,46	6,9	15,0
	6	0,30	6,6	14,5
Nb	АВ	4,8	8,3	14,1
	4-5	1,98	7,75	17,4
	2-3	2,06	7,8	17,2
	ДЭЖ	0,73	9,5	17,3
	БКС	0,77	7,9	17,5
	7	0,533	7,95	17,35
	6	0,352	7,75	17,05
Mo	АВ	4,5	7,8	13,2
	4-5	1,84	7,2	16,15
	2-3	1,95	7,35	16,2
	ДЭЖ	0,68	8,85	16,2
	БКС	0,725	7,4	16,4
	7	0,495	7,4	16,1
	6	0,33	7,25	16,0

Таблица 7

числу "атомных смещений на атом" железа, нейтронов и
и 75 Мвт соответственно, нормировка к 10^{22} нейтр/см²

Б О Р			
Ячейка, см	ϕ длбния	$E > 0,1$ Мэв	$E > 0,8$ Мэв
5,6	5,05	7,55	15,6
8,84	4,97	7,41	15,6
21,8	4,3	6,8	15,4
24,57	4,0	6,47	35,5
32,18	3,08	5,3	30,2
38,16	2,18	5,13	28,8
5,6	5,65	8,45	17,43
8,84	5,58	8,35	17,5
21,8	4,93	7,8	17,6
24,57	5,2	8,4	46,2
32,18	4,15	8,5	40,7
38,16	2,92	6,85	38,6
5,6	5,22	7,8	16,1
8,84	5,15	7,68	16,2
21,8	4,64	7,34	16,6
24,57	4,95	8,0	33,8
32,18	4,1	8,4	40,3
38,16	2,34	5,5	30,6

Таблица 8

Число "атомных смещений на атом", получаемых некоторыми стальными конструкционными элементами реакторов СМ-2 и БОР-60 за время службы

Реактор	С М - 2		Б О Р - 6 0	
Номинальная мощность, Мвт	75		40	
П о з и ц и я	А3	4-5 каналы	Ячейка 5,6 см	Ячейка 25,09 см
Поток по нейтронам деления, н/см ² сек x 10 ⁻¹⁵	4,22	1,49	2,23	1,35
Конструкционный элемент	Оболочка твэла	Элементы отражателя	Оболочка твэла	Боковой экран
Предположительная экпозиция при 100% мощности, сек x 10 ⁻⁷	1,05	63,0	3,13	31,5
Соответствующее максимальное выгорание, %	60	-	10	-
Число "атомных смещений на атом", атом ⁻¹	20,2	160	34,4	168

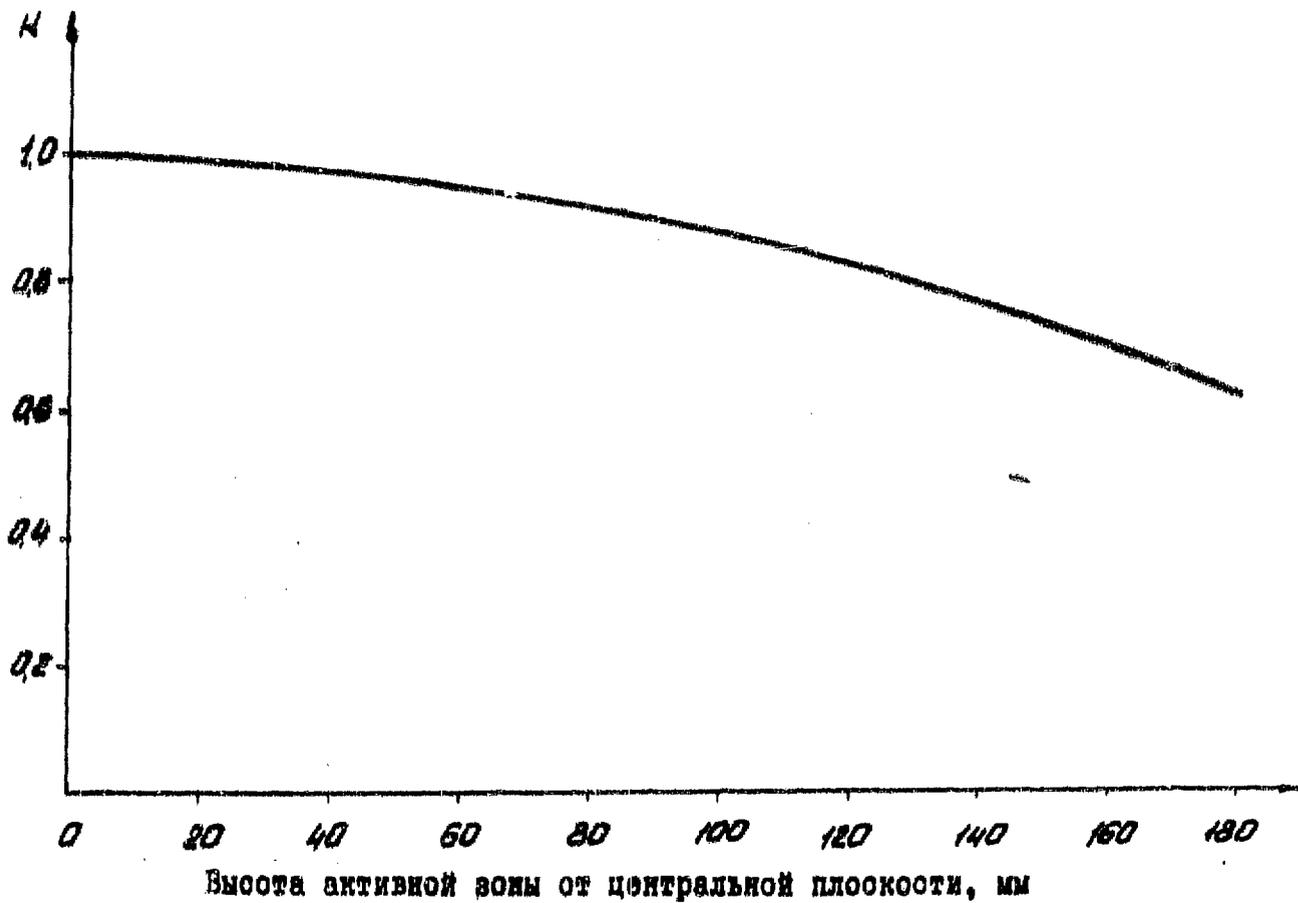


Рис. 3. Поправочный коэффициент K на высотное распределение нейтронов в реакторе СМ-2

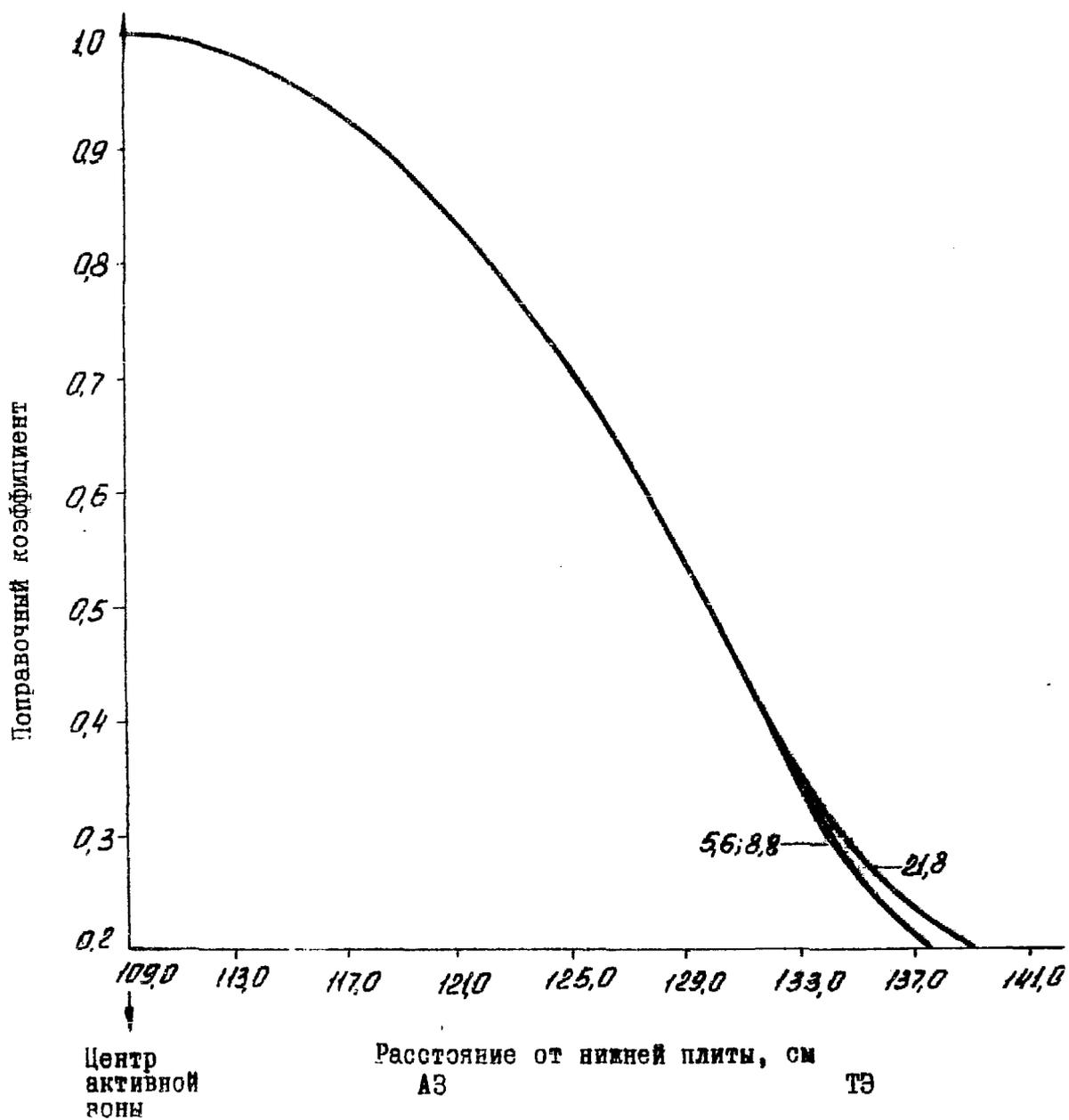
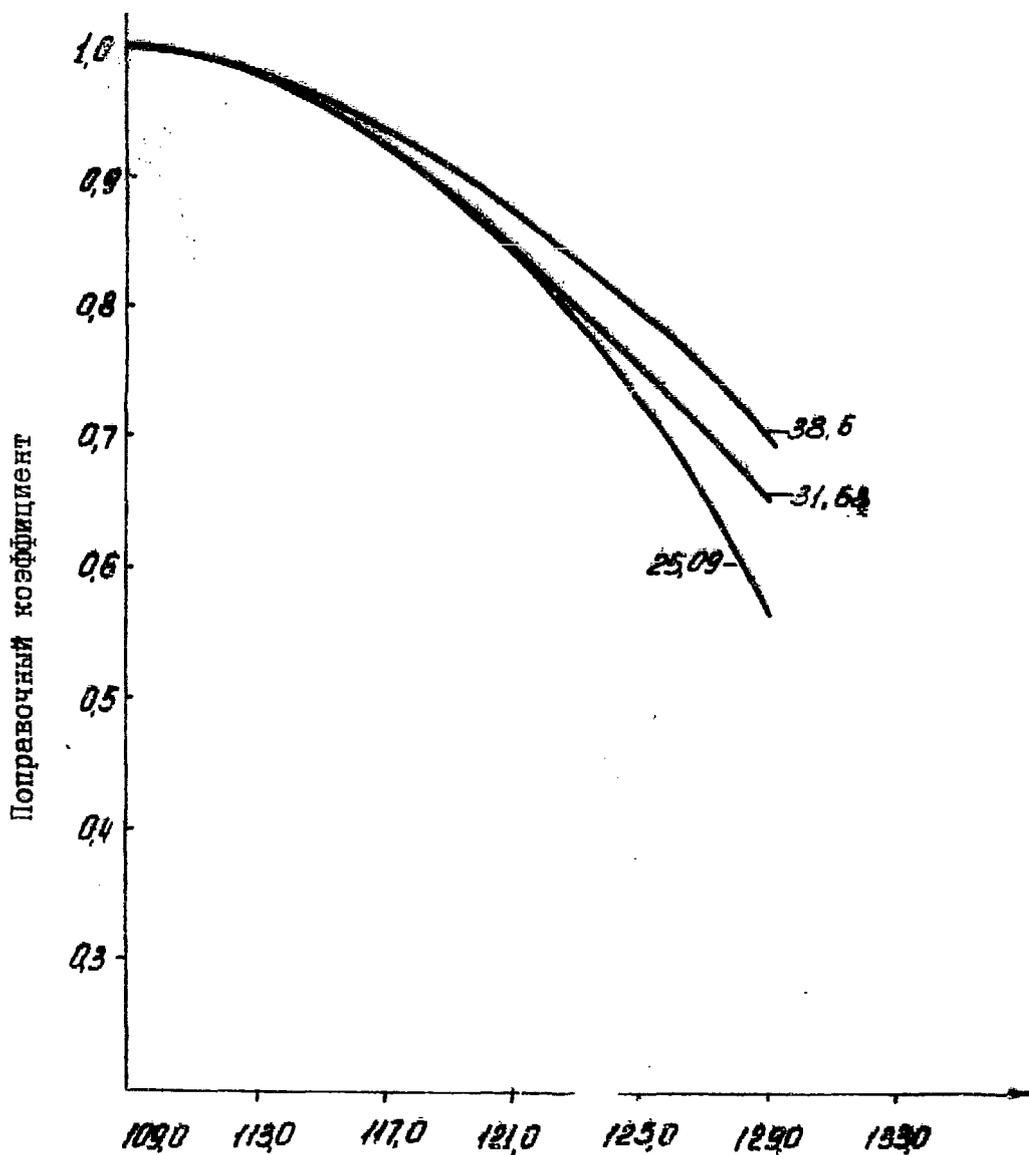


Рис. 4. Поправочный коэффициент на высотное распределение нейтронов в ячейках 5,6; 8,8 и 21,8 см реактора БОР-60



Расстояние от нижней плиты, см. Распределение симметрично относительно центра активной зоны

Рис. 5. Поправочный коэффициент на высотное распределение нейтронов в ячейках 25,09; 31,68 и 38,06 см реактора БОР-60

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исходя из проведенного анализа теоретических моделей радиационной повреждаемости твердых тел, в качестве рабочей выбрана модель Нельсона, Иферингтона и Смита.

2. Проведен расчет скоростей атомных смещений железа, ниобия и молибдена для позиций реакторов СМ-2 и БОР-60.

3. Сделан вывод о возможности использования реактора СМ-2 для изучения некоторых эффектов облучения быстрыми нейтронами.

4. Для железа, ниобия и молибдена даны таблицы пересчета от используемых дозных параметров к числу "атомных смещений на атом".

ЛИТЕРАТУРА

1. Claudson T.T. et al. Effect of fast flux irradiation on mechanical properties and dimensional stability of stainless steels. Nucl. Appl. Tech. 9 (1970) 10.
2. Claudson T.T. et al. Fundamental behavior of structural materials in fast reactors environments. IV UN PUAE conf. 49/P/067 Geneva (1971).
3. Nelson R.I. et al. Void formation in Ni, Type AISI 316 SS and Nimonic PE16 during 20 Mev C^{++} irradiation. ENES conf. on voids formed by irradiation of reactor materials. Proc. paper 18 (1971).
4. Williams T.M. The temperature dependence of void swelling in type AISI 316 SS irradiated with 20 Mev C^{++} ions ibid. paper 17.
5. Kinchin G.N., Pease R.S. The displacement of atoms in solids by irradiation. Reports on prog. phys. 18(1955)1.
6. Келли В. Радиационные повреждения твердого тела. Атомиздат, М. (1970).
7. Ohmae K., Hida B. On the atomic displacement by fast neutron. J. Nucl. mater. 42 (1972) 86.
8. Nelson R.S., Etherington E.W., Smith M.F. Recommended iron atomic displacement cross sections and displacement rates for use in fast reactors. TRG Report 2152(D) UKAEA (1972).
9. Абагян Л.П. и др. Групповые константы для расчета ядерных реакторов. Атомиздат, М. (1964).
10. Robbins R.E. Cavities in irradiated Type 316 SS. J. Nucl. mater. 33 (1969) 107.

11. Birss I.R. et al. A New source of helium in cladding materials. BNES conf, Proc. paper 33. (1971).
12. Baner A.A. et al. Helium producing in Ni and stainless steels. J. Nucl. mater. 42 (1972) 91.

Рукопись поступила в редакционно-издательскую группу ОНТИ 24.01.73г.
В окончательной редакции 19.03.73г.



Отпечатано в Научно-исследовательском институте атомных реакторов
имени В.И.Ленина

Т-03777 от 1.03.73.
Редактор Галимова Д.А.

Тираж 100.

I уч.-изд.л.
Май, 1973.