

О возможности *online* контроля радиационной нагрузки на корпус реактора ВВЭР - 1000

Ю. Л. Цоглин, НИО „KIW- Gesellschaft“, Дрезден

Доклад на международной конференции по проблемам АЭС, МНПК-10

Севастополь, 2-6 октября, 2012 г.

60-70 гг. – широкомасштабные реакторные испытания образцов материалов, создаваемых для корпусов ядерных реакторов с водой под давлением (ВВЭР). Задействованы практически все исследовательские реакторы СССР

Задание нейтронной экспозиции – характеристики радиационного воздействия нейтронного облучения на материалы - одна из важнейших задач для:

- обоснованного сравнения результатов испытаний (величин радиационных эффектов), особенно при наборе статистики;
- обоснованного (адекватного) переноса результатов испытаний на реальные объекты (прогнозирование изменения прочностных характеристик изделий)

Основные представления (предположения) в модели образования радиационных повреждений при облучении нейтронами:

1. При взаимодействии нейтронов с атомами материала (упругое и неупругое рассеяние) образуются первично выбитые атомы - ПВА
2. При движении ПВА возникает каскад смещений – смещённых атомов
3. ПВА и каскад смещений – это пары Френкеля: вакансия-междоузлие
4. Между концентрацией пар Френкеля в объёме облучаемого объекта и изменением его физических свойств существует однозначная связь, описываемая уравнением:

$$n_d = \int_0^{\infty} \Phi(E_n) \sum_i \sigma_i(E_n) g_i(E_n) dE_n$$

$\sum_i \sigma_i(E_n)$ - полное сечение взаимодействия нейтрона энергии E_n с атомом i – материала

$g_i(E_n)$ - функция повреждения – среднее число смещённых атомов i – материала на одно взаимодействие

Функции повреждения в моделях

1. Россина

$$g(E_n) = \frac{\alpha \cdot E_n}{4E_d}$$

T - энергия ПВА, переданная нейтроном [МэВ]

E_n - энергия нейтрона

E_d - пороговая энергия смещения

Приближение изотропного рассеяния

$T < T_{\text{ион}}$ - энергия процессов электронного возбуждения и ионизация атома

2. Кинчина - Пиза

$$g(E_n) = \frac{T_{\text{ион}}}{4E_d} \left[2 - \frac{T_{\text{ион}}}{\alpha E_n} \right], \text{ при } T \geq T_{\text{ион}}, n_d = 0 \text{ (только ионизация до } T < T_{\text{ион}})$$

$$\alpha = \frac{4mM_i}{(m + M_i)^2}, \text{ где } m, M_i - \text{масса нейтрона и масса } i - \text{атома}$$

3. Линхарда (Касакадная теория Кинчина – Пиза с поправкой Линдхарда)

$$f_L(T) = \frac{T_{\text{ат}}}{T} - \text{поправка Линхарда – доля переданной энергии ПВА, идущей на атомные столкновения в каскаде}$$

$$n_d = 0 \text{ при } T \approx T_{\text{ат}} < E_d; n_d = 1 \text{ при } E_d \leq T_{\text{ат}} < 2E_d; n_d = \frac{f_L(T) \cdot T}{2E_d} \text{ при } T_{\text{ат}} \geq 2E_d$$

n_d - скорость образования ПВА в ед. объёма на один нейтрон [$\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-3} \cdot \text{н}^{-1}$]

Спектр нейтронов – основная переменная величина трудно выражаемая количественно при оценке радиационного воздействия.

Позитивное решение:

в качестве единицы облучения использовать поток нейтронов с энергиями выше некоторой «пороговой» энергии $E_{\text{ПОР}}$.

Аналогия с пороговыми детекторами для измерения потоков нейтронов:

«поток по S^{32} , $E_{\text{ПОР}} > 3$ МэВ» *

«поток по J_n^{115} , $E_{\text{ПОР}} > 1,15$ МэВ » *

*Р.Д. Васильев, В.П. Ярына в СС «Вопросы атомной науки и техники», Серия: «Ядерные константы», вып. 13, М 1974

Условие определения $E_{пор}$

$$\frac{\int_0^{\infty} \Phi(E_n) \cdot \sigma_{i_{\text{вст}}}(E_n) \cdot g_i(E_n) dE_n}{\int_{E_{пор}}^{\infty} \Phi(E_n) dE_n} = Const = K$$

K - (по смыслу – эффективное сечение повреждения $\sigma_{пов}^{\text{эфф}}$)

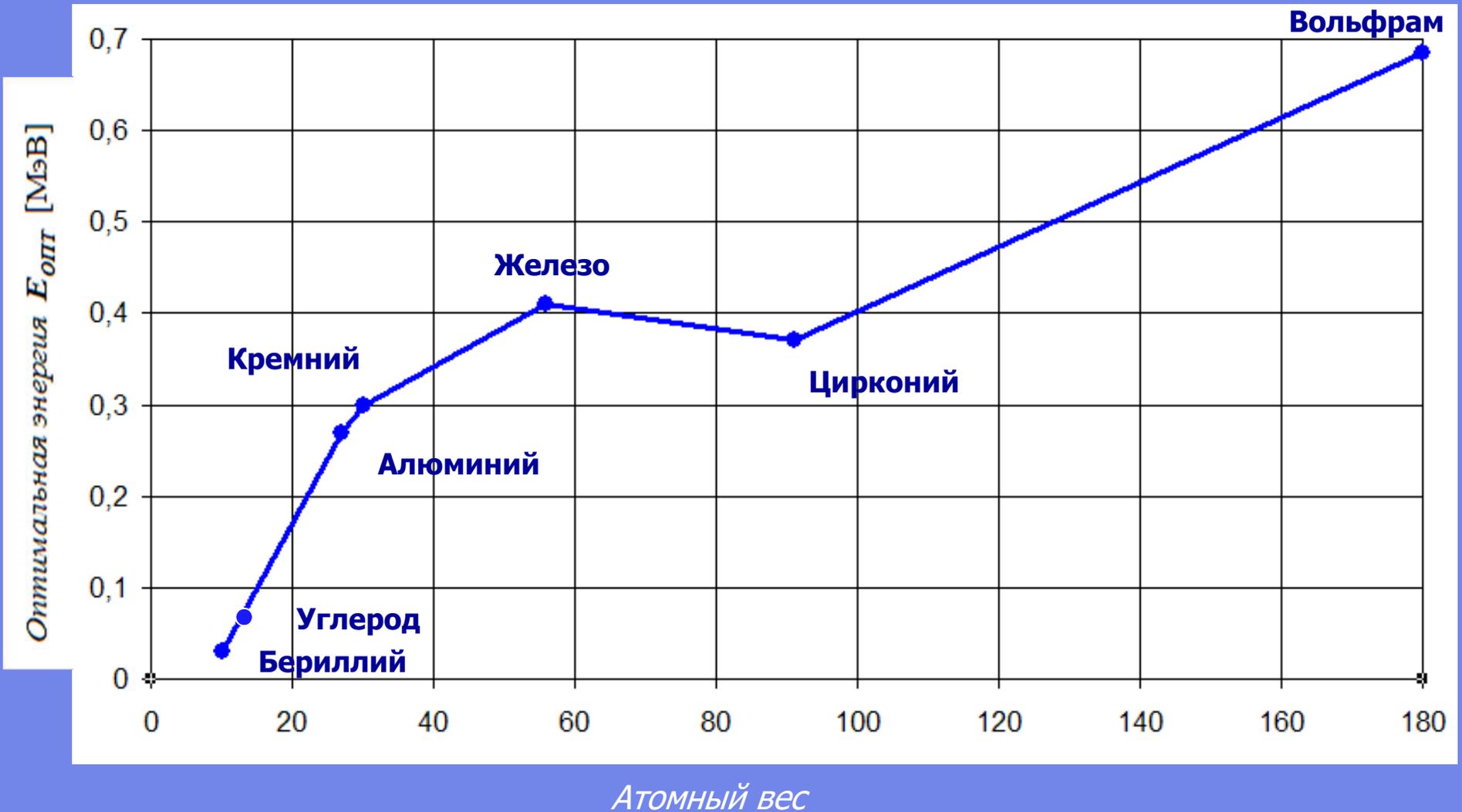
Поиски оптимального значения нижнего предела интегрального потока нейтронов, характеризующего масштаб радиационных повреждений в i -материале независимо от спектра нейтронов облучения с помощью численных экспериментов. Работы Россина, Кинчина-Пиза, Пономарева-Степного.

Дол и Йошикава рассчитали значения $E_{пор}$ для элементов с массовым числом от Be^9 до W^{184} в модели Кинчина-Пиза.

Канц предложил метод двух детекторов с разными порогами, дополнив значение потока выше порога значением средней энергии спектра, определяемой по специальной методике с участием детектора с другим порогом.

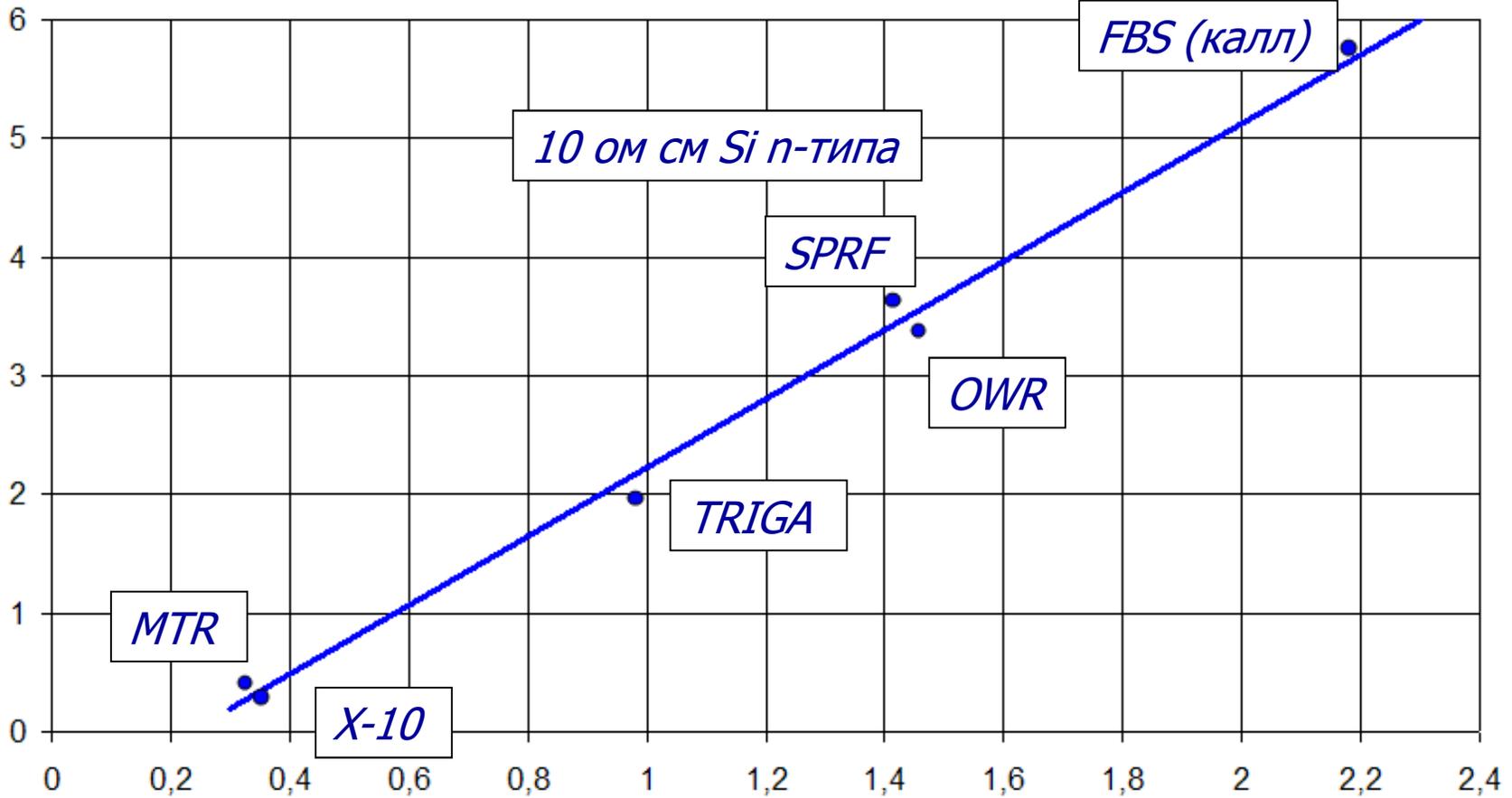
* Р.Д. Васильев, В.П. Ярына в «Вопросы татомной науки и техники». Серия: Ядерные константы, вып. 13, М., 1974

* Р.Д. Васильев, В.П. Ярына в «Вопросы татомной науки и техники». Серия: Ядерные константы, вып. 13, М., 1974



R. E. Dahl and H. H. Yoshikawa „Neutron-Exposure for Radiation Damage Studies. Nucl. Sci. And Engn, 21, 312-318, 1965

Отношение скорости увода носителей к интегральному потоку нейтронов с $E > 0,001$ МэВ, [см^{-1}]



Средняя энергия \bar{E} спектра нейтронов по Кантцу, [МэВ]

Задание нейтронной экспозиции по методу Кантца

В настоящее время в программе образцов-свидетелей, разработанной для мониторинга состояния корпуса ВВЭР и прогнозирования его радиационного ресурса, учёт радиационного воздействия производится по флюенсу быстрых нейтронов с энергией выше 0,5 МэВ.

При этом, согласно регламентного документа (Руководство по безопасности РБ-007-99) должны также определяться dpa , dpa/c - число и скорость (c^{-1}) смещений на атом, SI_E - спектральный индекс, [отн. ед.], $R(i)$ – уд. скорость реакции в i -м нейтронноактивационном детекторе, Бк/ядро (распад/с·ядро).

Однако величина радиационного воздействия определяется только по величине потока нейтронов с энергией выше 0,5 МэВ, а остальные параметры в учёте не участвуют.

№	$E_j^{min} - E_j^{max}$	\bar{E}_j	Спектр нейтронов БР-I	Вклад (%) учитываемых (1-j) групп нейтронов в интеграл передачи энергии материалам		
				H	Cr	Bi
1	6,5-10,5 МэВ	8,5 МэВ	0,00149	1,036	2,440	2,252
2	4,0-6,5	5,25	0,00739	5,387	11,165	10,349
3	2,5-4,0	3,25	0,00865	9,590	19,133	17,556
4	1,4-2,5	1,95	0,06070	33,724	48,802	48,125
5	0,8-1,4	1,10	0,06290	53,005	67,719	64,920
6	0,4-0,8	0,6	0,06007	66,968	78,391	76,407
7	0,2-0,4	0,3	0,08964	81,771	85,949	87,613
8	0,1-0,2	0,15	0,07706	90,412	93,586	93,593
9	46,5-100 КэВ	73,25 КэВ	0,07234	95,454	97,571	96,702
10	21,5-46,5	34	0,06290	97,868	98,306	98,190
11	10-21,5	15,75	0,05921	99,039	98,798	99,112
12	4,65-10	7,325	0,05622	99,579	99,688	99,354
...						
25	0,215-0,465	0,34	0,01456	100,000	100,000	100,000

Учёт радиационного воздействия будет более адекватным и физически обоснованным, если его задавать величиной энергии, переданной нейтроном первично выбитому атому при рассеянии (или числом ПВА), т. е.

$$n_d = \frac{1}{2E_d} \cdot J_i$$

где J_i - интеграл передачи энергии нейтроном ПВА

Численными экспериментами рассчитывались интегралы передачи энергии J_i и J_H .

Для этого использовались:

- 26 – групповая система констант
- набор (14) нейтронных спектров реакторов БР, УТР, ВВР, ИТР
- набор из 20-ти материалов от ^9Be до ^{184}Bi и водород
- модели: Россина, Кинчина-Пиза, Линдхарда

Учитывая $W_i^n = \Phi_0 \cdot J_i$, получено

- метод единичного водородного детектора $W_i^n = C_{0_i} \cdot W_H^n$, $\delta = 3 - 13\%$

C_{0_i} - константы, W_H^n - доза нейтронов в водороде

- метод пары детекторов: водородный плюс пороговый детектор деления ^{238}U ($E_{\text{пор}} \approx 1,6$ МэВ). $W_i^n = (C'_{0_i} + C'_{1_i} \cdot P_{fH}) \cdot W_H^n$, $\delta \leq 3,3\%$

C'_{0_i} , C'_{1_i} - константы,

$P_{fH} = \frac{W_f^{U238}}{W_H^n}$ - спектральный параметр,

W_f^{U238} - тепловыделение (доза) в $U238$ от реакции $n \rightarrow f$

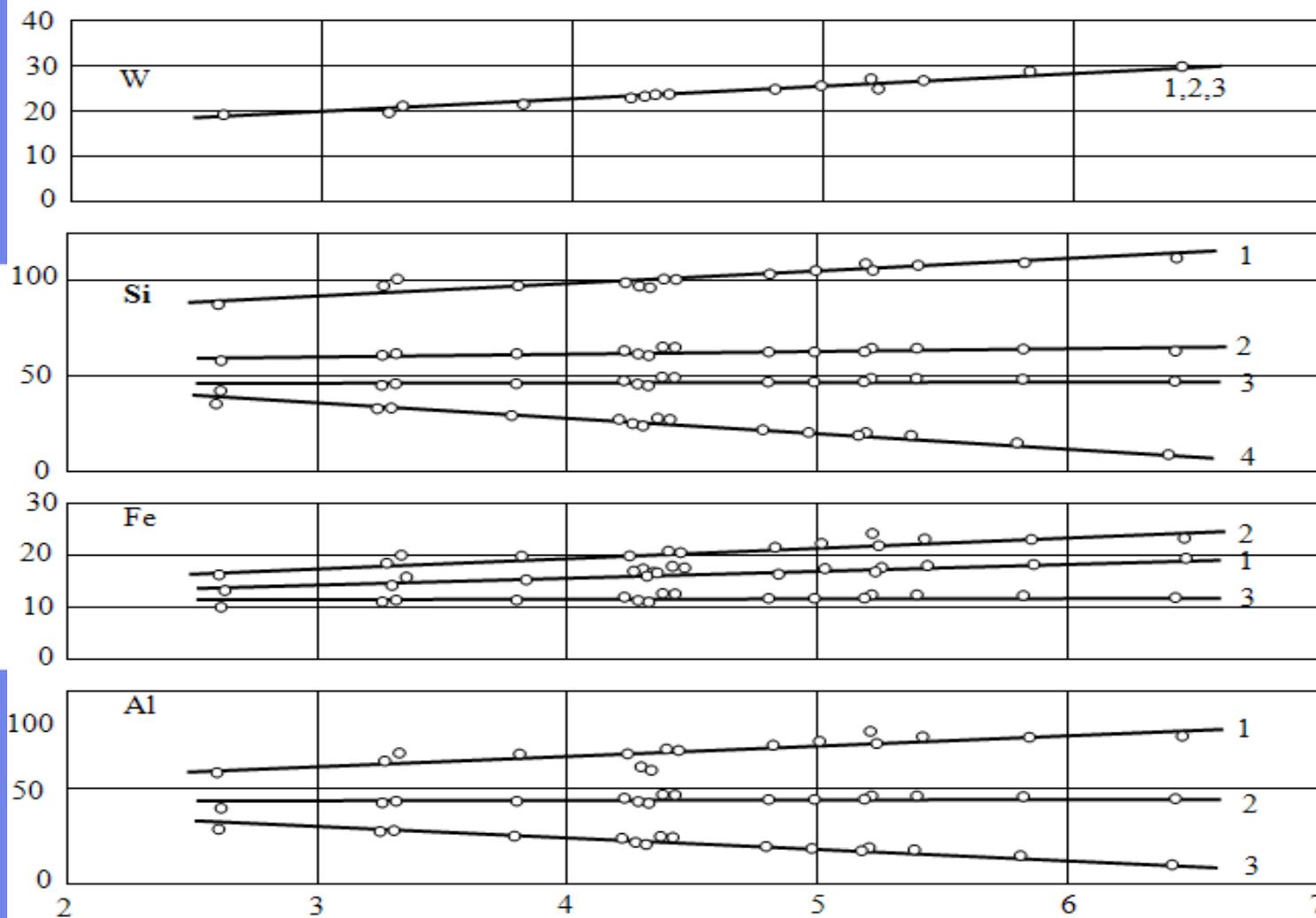
Материал	Вид и параметры аппроксимирующей функции							
	$W_i/W_H = C_0$		$W_i/W_H = C_1 + C_2 \cdot P_{UH}$			$W_i/W_H = C_1 + C_2 \cdot P_{SH}$		
	$C_0 \cdot 10^4$	$\delta \left(\frac{W_i}{W_H} \right), \%$	$C_1 \cdot 10^4$	C_2	$\delta \left(\frac{W_i}{W_H} \right), \%$	$C_1 \cdot 10^4$	C_2	$\delta \left(\frac{W_i}{W_H} \right), \%$
Be	269,0	6,4	191,0	17,1	1,8	226,0	5,66	1,9
B(II)	152,0	5,57	113,7	8,518	1,34	131,4	2,73	1,88
C	151,0	8,8	90,2	13,5	1,8	117,5	4,46	2,04
N	95,0	6,6	65,9	6,4	0,90	78,70	2,12	0,95
O	92,4	3,3	89,3	0,685	3,2	91,4	0,12	3,25
Mg	41,6	3,5	35,7	1,29	1,7	38,0	0,470	1,00
Al	34,4	7,3	22,8	2,55	1,3	28,0	0,837	1,49
Si	30,6	5,6	22,9	1,69	1,6	26,5	0,542	2,08
Ti	13,1	11,3	6,32	1,485	2,5	9,25	0,496	2,13
V	13,8	10,6	7,12	1,47	2,2	9,99	0,493	1,49
Cr	8,47	5,7	6,26	0,485	1,2	7,32	0,148	2,42
Fe	10,1	13,0	3,98	1,346	1,9	6,65	0,448	1,53
Ni	9,0	7,9	5,74	0,717	1,7	7,13	0,243	0,62
Cu	8,68	10,6	4,48	0,923	2,3	6,28	0,311	1,2
Zr	5,56	6,9	3,82	0,384	1,9	4,572	0,12	1,56
Nb	5,39	6,7	3,76	0,358	1,9	4,46	0,120	1,56
Mo	5,16	8,2	3,23	0,424	1,8	4,07	0,142	1,45
Ta	1,8	11,3	0,856	0,207	1,7	1,27	0,068	1,95
W	1,7	11,0	0,827	0,192	1,7	1,21	0,054	0,62
Pb	1,34	11,8	0,604	0,163	1,7	0,929	0,0539	1,60
Bi	1,32	12,4	0,564	0,166	1,9	0,893	0,0554	1,32

Нейтронная экспозиция для величины радиационного эффекта, нормированного на интенсивность (нейтронная доза в водороде) в таком подходе задаётся в функции от спектрального параметра - P_{fH} .

Вещество	$n_d/W_H^n = c_0$		$n_d/W_H^n = c_1 + c_2 w_{fH} / W_H^n$			$n_d/W_H^n = c_1 + c_2 A_S / W_H^n$		
	c_0	$\delta, \%$	c_1	c_2	$\delta, \%$	c_1^*	c_2^*	$\delta, \%$
Be	2,83	4,30	2,28	1200	1,41	2,52	402	1,20
C	1,63	6,10	1,18	980	1,70	1,37	328	1,45
Mg	0,52	4,30	0,61	-205	2,00	0,561	-58,5	2,73
Al	0,430	1,40	0,407	51,1	0,70	0,416	18,3	0,53
Si	1,09	1,70	0,600	108	1,40	1,06	29,1	1,5
Ti	0,17	5,40	0,130	85,4	2,4	0,147	28,2	2,5
V	0,211	4,48	0,170	89,6	1,8	0,187	30,0	1,7
Cr	0,135	2,07	0,135	1,66	2,1	0,137	-1,79	2,0
Fe	0,160	7,6	0,103	126	0,90	0,129	41	1,6
Ni	0,148	2,3	0,13	34,7	0,60	0,139	11,6	0,50
Cu	0,165	5,4	0,124	89,9	1,2	0,142	29,6	1,20
Ge	0,176	6,21	2,26	-1120	1,0	2,04	-368	1,0
Zr	0,106	4,9	0,082	51,6	1,4	0,093	16,8	1,6
Nb	0,103	4,8	0,080	48,6	1,4	0,090	15,8	1,6
Mo	0,066	6,2	0,047	41,8	1,2	0,056	13,6	1,5
Ta	0,036	11,0	0,017	41,4	1,7	0,025	13,7	2,0
W	0,024	11,0	0,012	27,5	1,8	0,017	9,11	1,6
Pb	0,027	12,0	0,12	32,5	1,7	0,018	10,8	1,6
Bi	0,026	12,0	0,011	33,3	2,0	0,018	11,1	1,4

$$\frac{n_d}{W_H^n} = (C_1 + C_2 \cdot P_{fH}) \quad P_{fH} = \frac{W_f^{U238}}{W_H^n}$$

n_d^i / W_n^H , отн. ед.



$P_{dH} \times 10^3$, делений / МэВ

- 1 – функция $\nu(E)$, рассчитанная без учёта ионизационных потерь, согласно модели Россина;
- 2 – то же с учётом ионизационных потерь по расчётам Огородника
- 3 – то же, согласно модели Кинчина и Пиза
- 4 – то же, согласно модели Линдхарда

Приборная реализация такого метода задания нейтронной экспозиции – набор калориметрических детекторов интегрального теплового потока (Ю. Л. Цоглин, доклад на МНПК-8, 2010) с образцами: циркония (Zr), гидрида циркония (ZrH_2), железа (Fe), и фоном

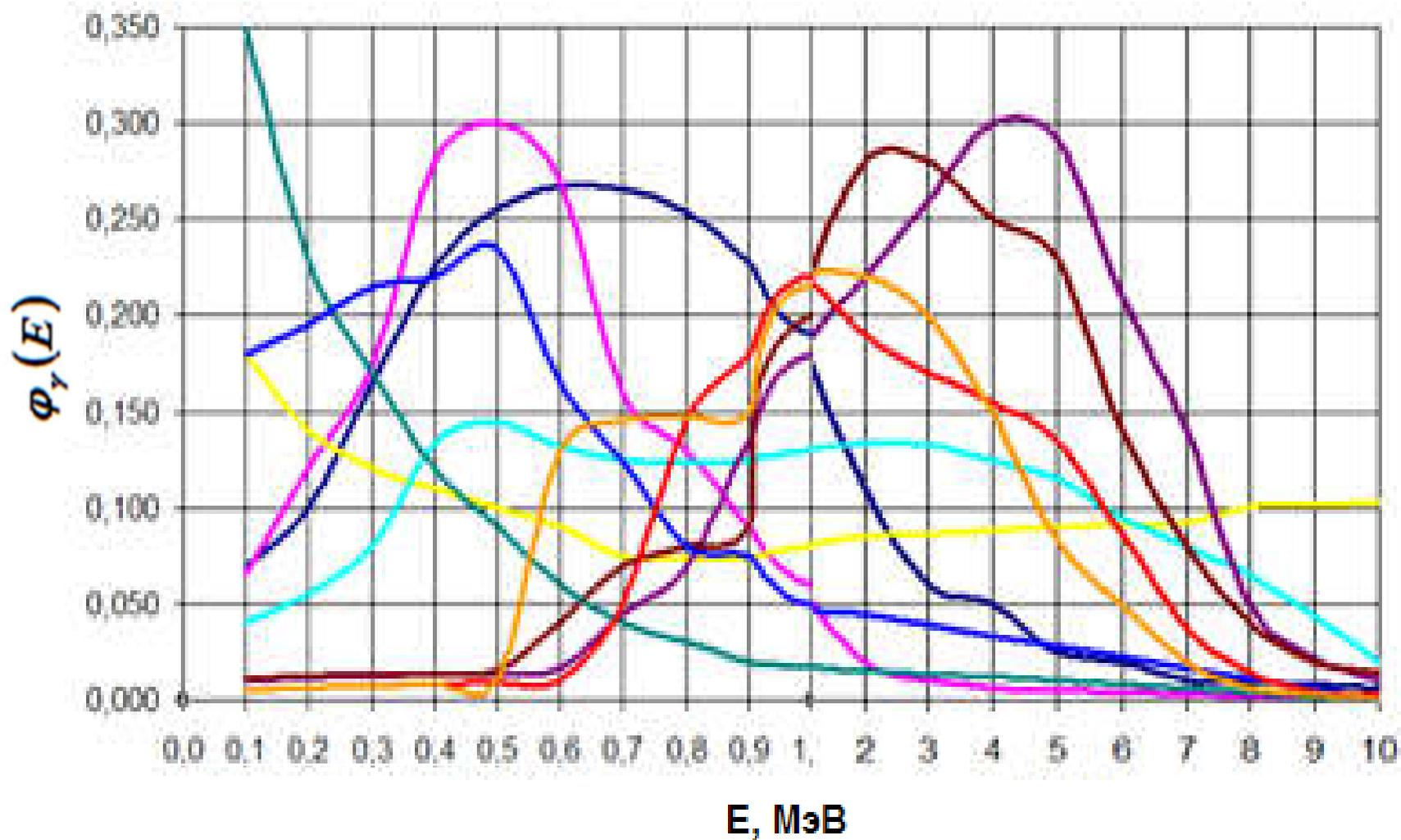
Алгоритм измерений

$$W_H^n = W_H - W_H^\gamma,$$

$$W_H^\gamma = (C_{1H}^\gamma + C_{2H}^\gamma \cdot P_\gamma) \cdot W_{Zr}$$

W_H^γ - доза γ - излучения в водороде

$P_\gamma = \frac{W_{Fe}}{W_{Zr}}$ - спектральный параметр γ - поля



Дифференциальные спектры γ – излучения, использованные в расчётах

Материал	C_0	C_1	$\delta, \%$
H	-0,791	2,82	4,79
Be	-0,352	1,27	4,06
B	-0,366	1,39	3,94
C	-0,398	1,43	3,74
N	-0,416	1,44	3,29
O	-0,399	1,43	3,4
Mg	-0,370	1,39	2,83
Al	-0,354	1,36	2,35
Si	-0,359	1,39	2,13
Ca	-0,240	1,29	1,00
Ti	-0,105	1,02	2,67
V	-0,123	1,08	0,49
Cr	-0,090	1,07	0,36
Co	0,050	0,936	0,07
Ni	0,090	0,939	0,77
Cu	0,204	0,783	0,26
Ge	0,331	0,655	0,63
Y	0,992	0,505	2,19
Nb	1,10	-0,082	0,10
Mo	1,73	-0,773	2,13
Cd	1,78	-0,782	1,24
Sn	1,95	-0,912	1,62
Ta	3,83	-2,49	8,73
W	3,79	-2,43	9,41
Pb	3,88	-2,34	12,9
U	3,94	-2,12	16,4

$$W_i^\gamma = (C_{0i} + C_{1i} \cdot P_\gamma) \cdot W_{Zr}$$

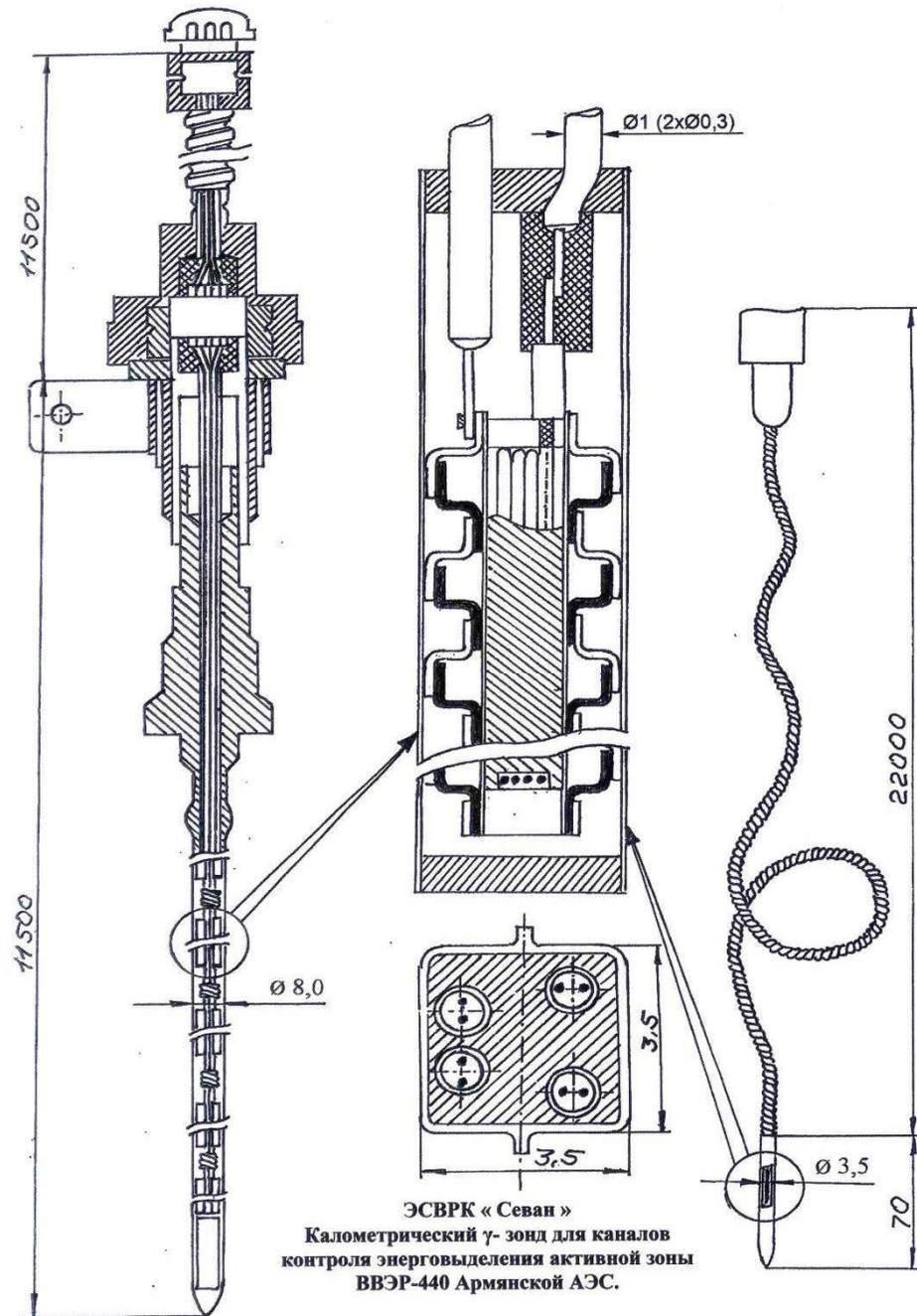
где $P_\gamma = \frac{W_{Fe}}{W_{Zr}}$

Экспериментальная проверка концепции спектрального параметра гамма-излучения

Спектральный параметр	Cu		Al		C		Pb		W	
	Эксперимент	Расчёт								
Излучение отработанных ТВЭЛов										
0,657	645	652	520	515	510	510	-	-	-	-
0,710	410	412	340	352	370	360	-	-	-	-
0,740	204	216	-	-	185	190	-	-	-	-
0,823	39	39	38	37	-	-	90	92	78	85
Излучение ^{60}Co										
0,9	1500	1520	-	-	1600	1620	-	-	-	-

Измерения в хранилище отработанных ТВЭЛов реактора ВВР-М, Киев, измеренная доза в [рад/г]

Материал	Уран-графитовый реактор «ВЕРО»		Реактор ВВР-Ц (каналы № 3, 10)	
	Эксперимент	Расчёт	Эксперимент	Расчёт
Be	1,26	1,27	-	-
C	1,43	1,50	4,6; 3,8	4,4; 3,7
Al	1,41	1,40	-	-
Fe	1,40	-	5,17; 4,24	-
Zr	1,40	-	7,81; 5,94	-
Pb	1,71	1,69	-	-
H_2O	1,59	1,63	-	-
D_2O	1,43	1,50	-	-
BeO	1,38	1,44	-	-
$(CH_2)_n$	1,63	1,69	-	-
H	2,83	2,83	-	-
D	1,40	1,41	-	-
O	1,43	1,51	-	-



ЭСВРК «Севан»
 Калометрический γ -зонд для каналов
 контроля энерговыделения активной зоны
 ВВЭР-440 Армянской АЭС.

