

**РАСЧЕТ И ЭКСПЕРИМЕНТ
ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА**

Щуровская М.В.
(МИФИ)

Классификация программ нейтронно-физического расчета

По тематике:

- ПС для расчета пространственно-энергетического распределения нейтронов (ПС спектрального расчета)
- ПС для расчета изотопного состава
- ПС - имитаторы работы активной зоны реактора
- ПС нейтронно-физического расчета - модули динамических ПС

По точностным характеристикам:

- Реперные ПС
- Инженерные ПС

Развитие программ н-ф расчета

Инженерные	Прецизионные	
Диффузионные 2-групповые двумерные конечно-разностные	Монте-Карло	Детерминист.
Диффузионные 3-8 -групповые трехмерные конечно-разностные		
Диффузионные 3-8 -групповые трехмерные нодальные		

Программы расчета (зарубежные ИР)

Название	Тип	Расположение	Программы
SAFARI-1	MTR	South Africa	MGRAC, HEADE
HOR	MTR	Delft University of Technology, Netherlands	SCALE (KENO -Va) OSCAR-3
MITR-II	D2O reflector	Argonne National Laboratory	MCNP
PARR-1	MTR	Pakistan Institute of Nuclear Science and Technology	CITATION, WIMS-D/4
MARK II	TRIGA	Atomic Energy Research Establishment, Savar, Dhaka	MCNP4C, CITATION
IPR-R1	TRIGA	Brazil	CITATION, WIMS-D/4

Программы расчета (отечественные ИР)

Название	Расположение	Программы
СМ	НИИАР	MCU-RR/P
ВВР-М	ПИЯФ	MCU-RFFI/A, HEXA
ВВР-ц	Обнинск	HEXA
ИР-8	РНЦ КИ	IRT-2D/PC предполагается MCU-RFFI/A
ИРТ-1	"Тажура", Ливия	MCU-RFFI/A, R32, WIMS-D4 (расчеты НИКИЭТ)
ИРТ-Т	Томск	IRT-2D/PC (расчеты РНЦ КИ) TIGRIS, GETERA (расчеты МИФИ)
ИРВ-М2	НИИП, Лыткарино	ДМГ, WIMS-D4, MCU-RFFI/A (расчеты НИКИЭТ) TIGRIS, GETERA (расчеты МИФИ)
ИРТ МИФИ	МИФИ	TIGRIS, GETERA

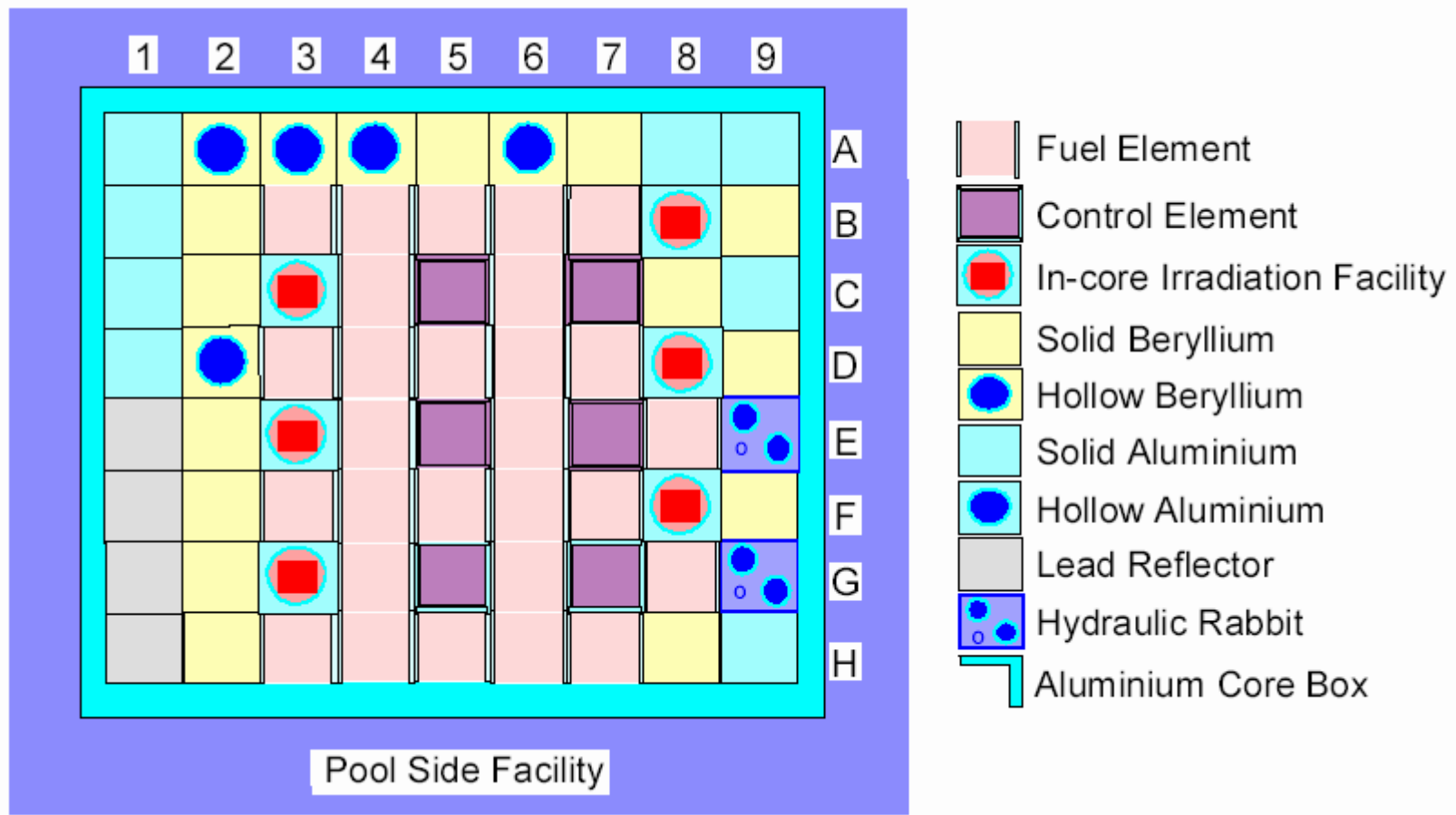
Прецизионное ПС

- ☛ Расчет условий облучения в ЭК
- ☛ Расчет потвэльного энерговыделения
- ☛ Прогноз при выборе новых конструктивных решений
- ☛ Расчет наиболее важных эксп. крит. состояний. Контроль погрешности инженерного ПС →

Инженерное ПС

- ☛ ← Расчет 3-мерного распределения выгорания
- ☛ Расчет эффективности РО СУЗ, запаса реактивности. Моделирование градуировки РО СУЗ
- ☛ Расчет всех эксп. крит. состояний

SAFARI-1 reactor



HOR- pool-type research reactor (Delft University)

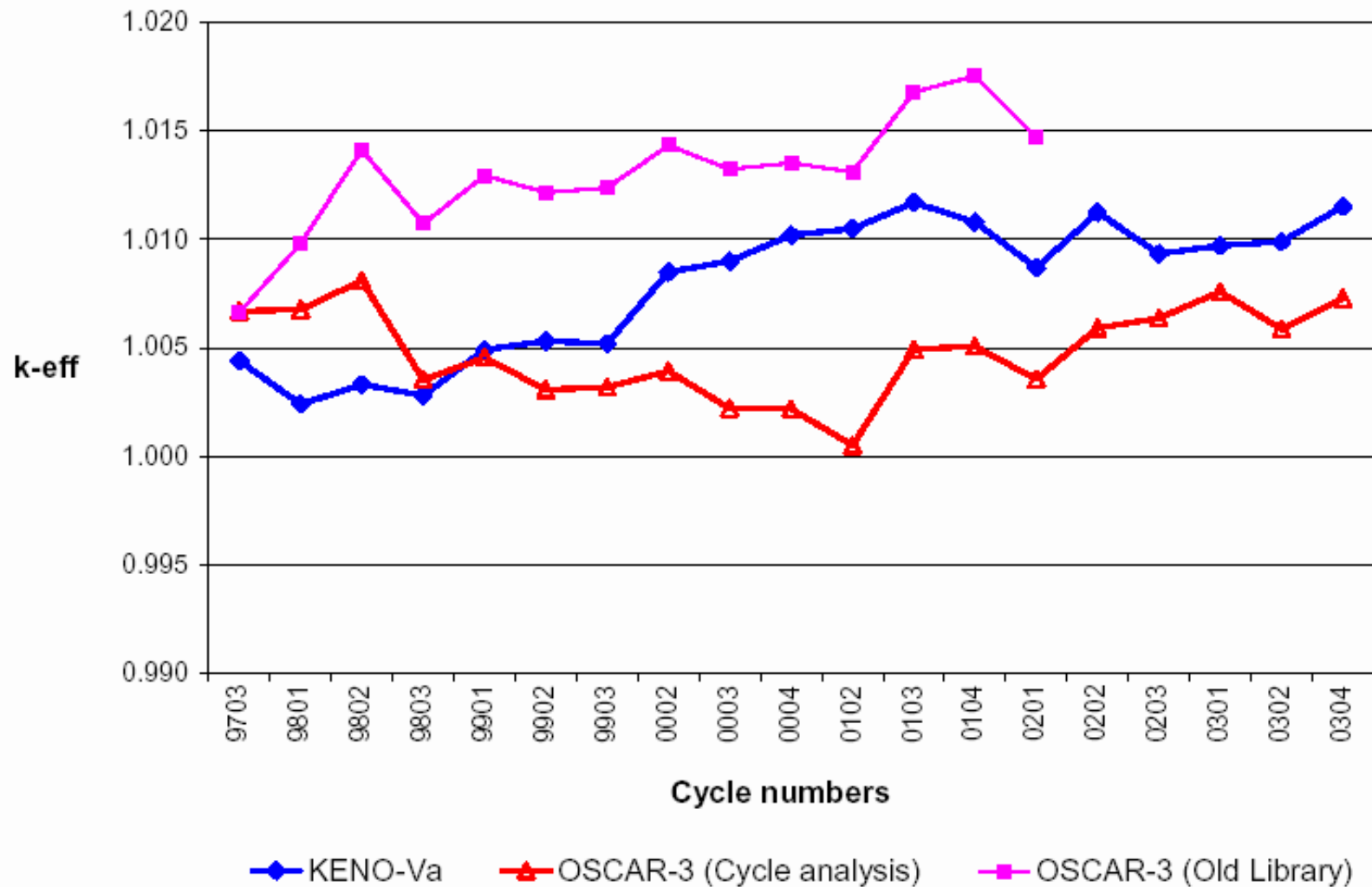
A1 P31	B1 R-19	C1 R-24	D1 R-29	E1 R-17	F1 R-18
A2 R-20	B2 Bigbebe	C2 E-08 14.5	D2 E-11 10.8	E2 E-02 28.5	F2 R-16
A3 R-15	B3 E-06 22.0	C3 DC-15 40.0	D3 D-76 47.4	E3 EC-01 3.1	F3 E-01 27.7
A4 R-13	B4 E-13 5.3	C4 D-77 48.0	D4 Smallbebe	E4 E-12 8.6	F4 E-09 13.2
A5 R-14	B5 E-07 19.3	C5 DC-14 43.3	D5 D-83 47.6	E5 EC-02 0.0	F5 E-03 27.8
A6 R-25	B6 R-28	C6 E-05 23.3	D6 E-10 12.2	E6 E-04 24.0	F6 R-26
A7 R-12	B7 R-22	C7 R-21	D7 R-27	E7 R-30	F7 R-23

Beryllium

Control element

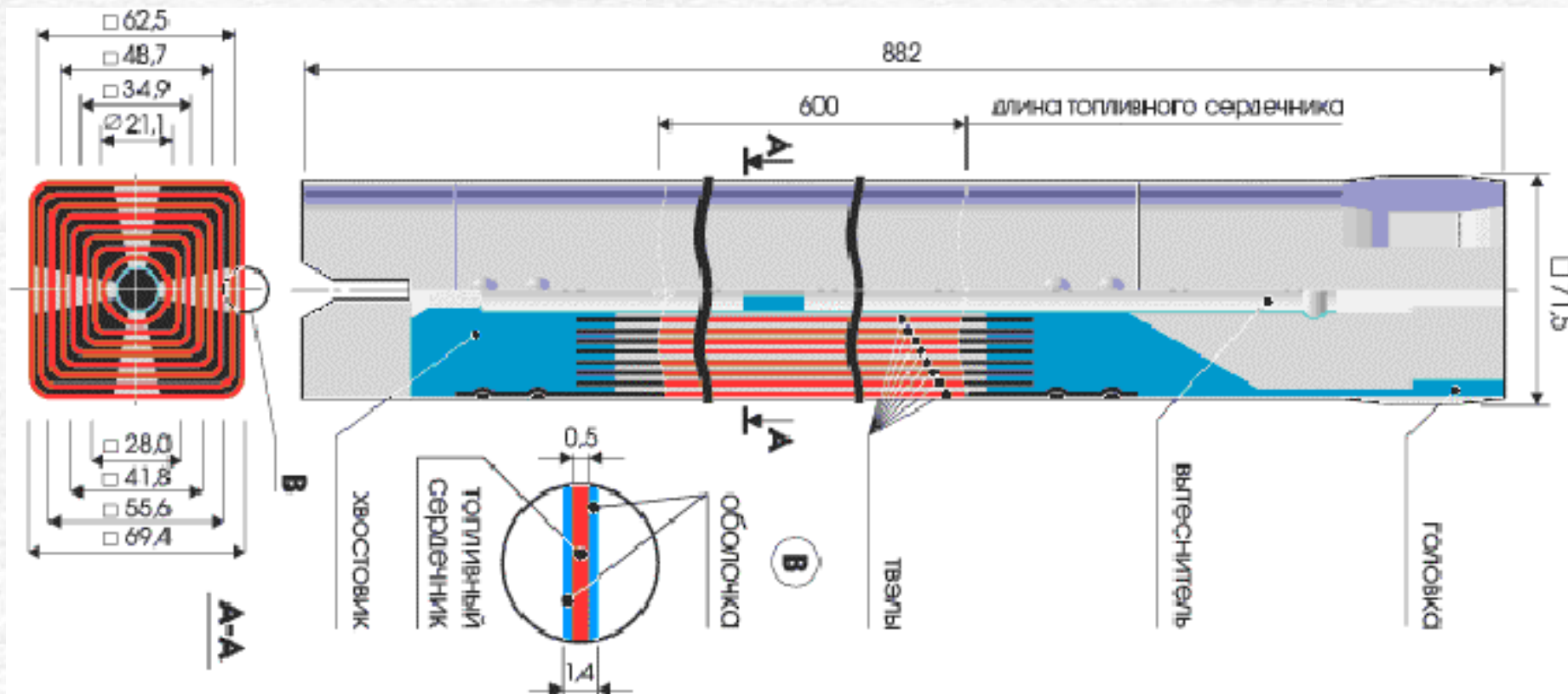
Standard MTR fuel element

OSCAR-3

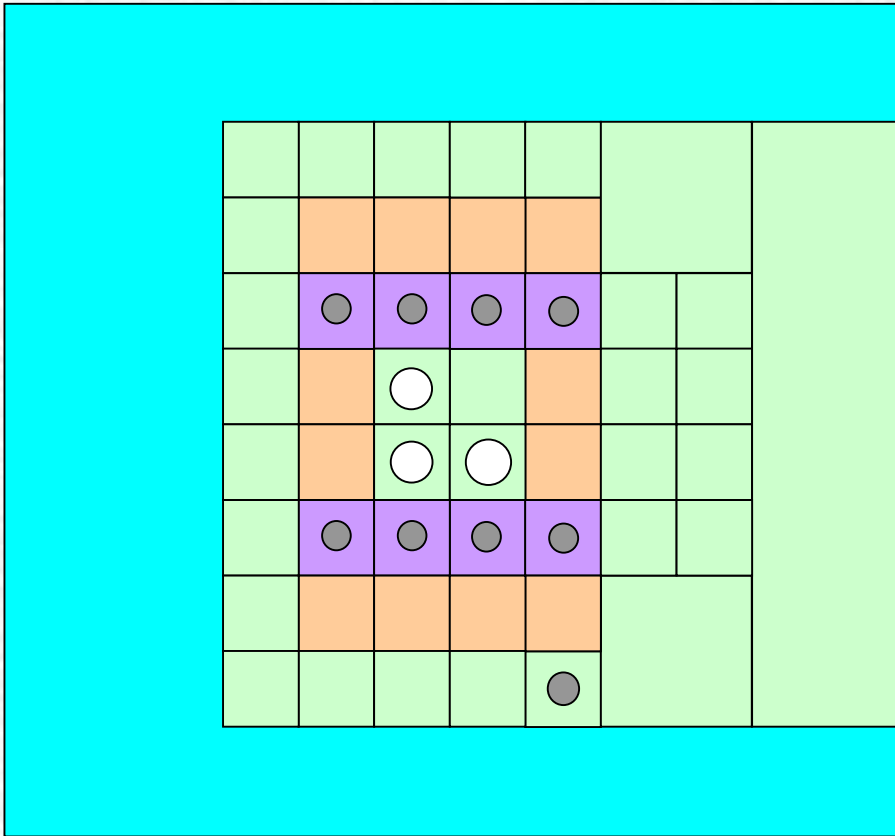


BOC calculated k-effective compared with start-up critical conditions.

ТВС ИРТ-3М



ИРТ-Т



- ТВС ИРТ-3М



- ТВС ИРТ-3М с каналом СУЗ



- вода



- бериллий



- бериллиевый блок с ВЭК

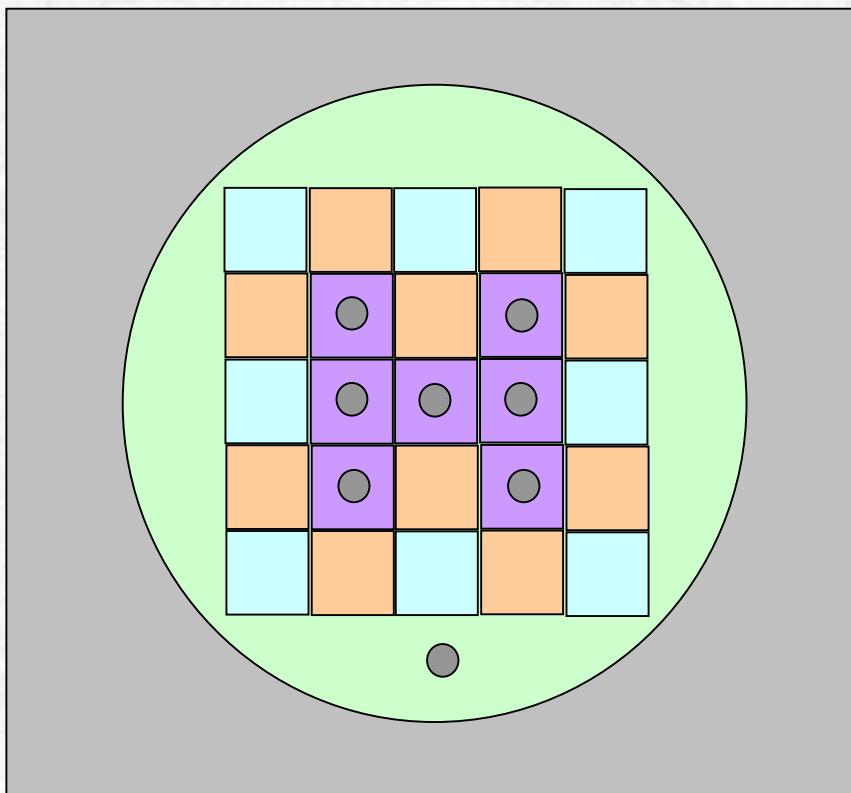







- графит



- алюминиевый блок

ИРВ-М2



-  - ТВС ИРТ-2М
-  - ТВС ИРТ-2М с каналом СУЗ
-  - алюминиевый блок
-  - бериллий
-  - графит

Расчетные характеристики

1. Критическое положение РО СУЗ для холодного неотравленного состояния
2. Критическое положение РО СУЗ для горячего отравленного состояния
3. Эффективность РО СУЗ
4. Запас реактивности
5. Подкритичность при взведенных РО СУЗ АЗ
6. Изменение реактивности за счет ^{135}Xe , ^{149}Sm
7. Изменение реактивности за счет выгорания топлива
8. Изменение реактивности при перегрузке
9. Изменение реактивности за счет Li-6, He-3
10. Длительность кампании
11. Распределение глубины выгорания по ТВС
12. Распределение энерговыделения по ТВС
13. Распределение малогрупповой плотности потока нейтронов по активной зоне

Основные причины существенного несовпадения с экспериментом

1. Неудачно выбраны параметры расчетной модели
2. Неопределенности в исходных данных для расчета за счет конструктивных и технологических допусков и погрешностей измерения
3. Неадекватная процедура сопоставления расчета и эксперимента
4. Большая погрешность экспериментального определения характеристик

Параметры расчетной модели

1. Трехмерность. Шаг расчетной сетки, соответствующий выбранному методу.
2. Число групп более 2-х.
3. Трехмерное поле выгорания.
4. Возможность учета ячеек с частично погруженным стержнем (по высоте).
5. Возможность учета перемещения по высоте системы из трех частей:
 - поглощающий стержень - проставка - концевик;
 - поглощающий стержень - проставка - ТВС.
6. ЭК и другие особенности отражателя учитываются путем подготовки соответствующих макроконстант (в основном - с учетом объемных долей материалов).

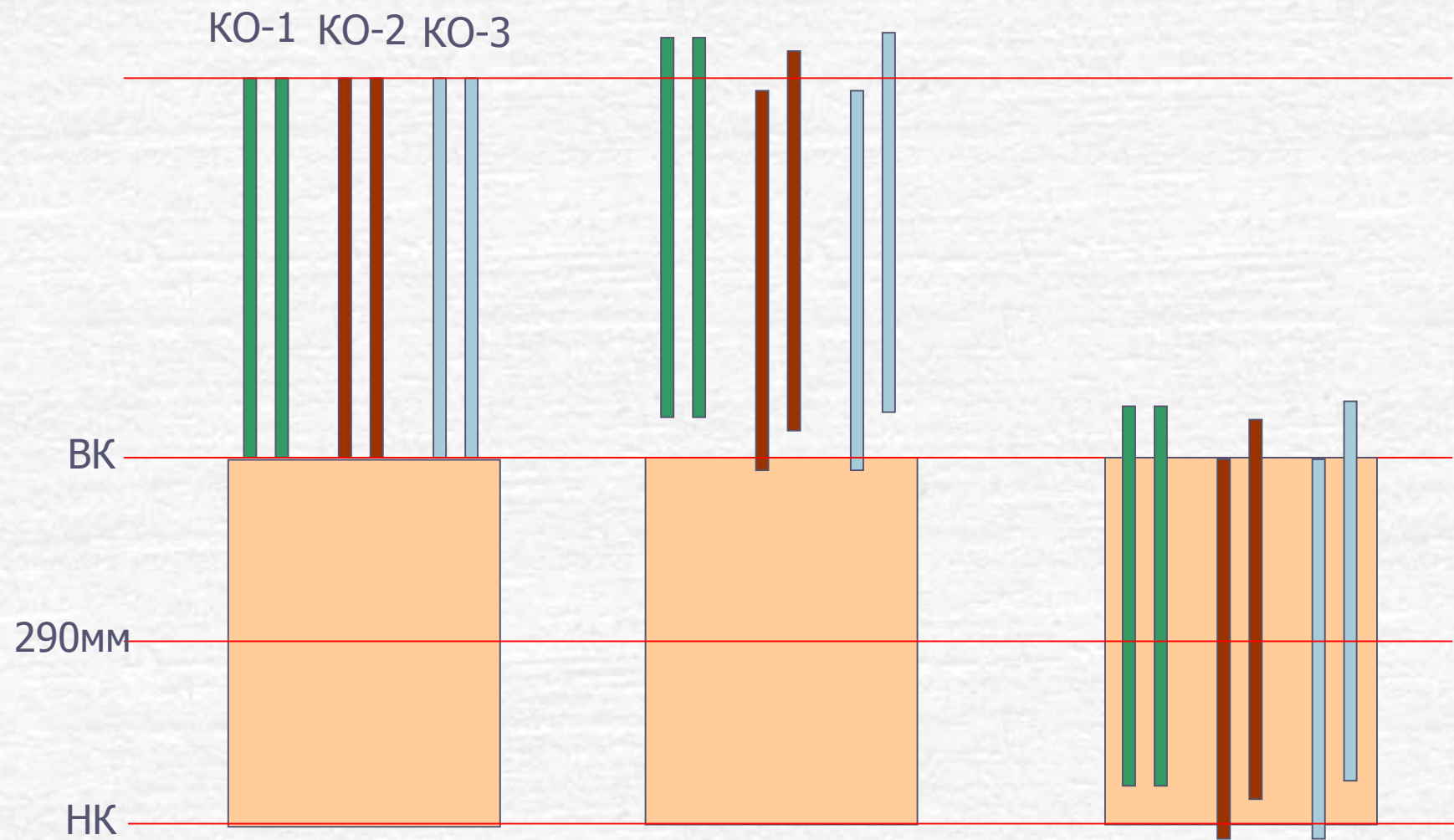
Параметры расчетной модели

7. Расчет концентраций ^{135}Xe , ^{149}Sm , ^6Li , ^3He в реакторной программе.
8. Учет реального графика перемещения РО СУЗ в процессе выгорания.
9. *Возможность учета индивидуальной исходной загрузки ^{235}U в ТВС.
10. *Возможность учета неравномерности исходного распределения ^{235}U по высоте ТВС.

Неопределенности и погрешности, наиболее часто ответственные за расхождение расчета и эксперимента

1. Реальная высота подвески РО СУЗ сильно отличается от указанной в проектной документации (следовательно, задаваемое в расчете положение поглотителя относительно активной части ТВС не соответствует реальности).
2. Погрешность измерения тепловой мощности больше 10%.

Высота подвески стержней



Высота подвески стержней

КО-1=НК КО-2=ВК КО-3=ВК

КО-1=290 КО-2=290 КО-3=ВК

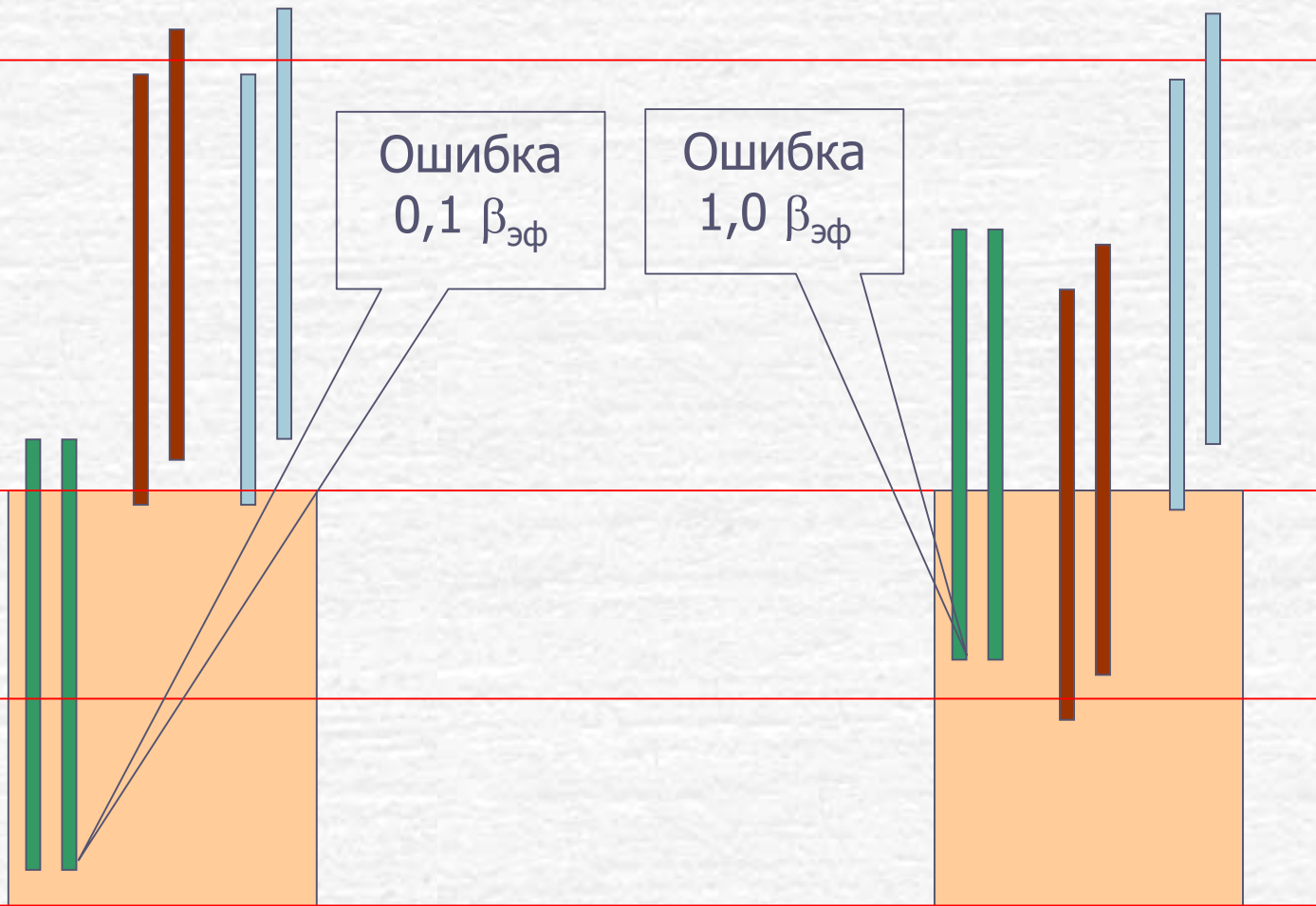
Ошибка
0,1 $\beta_{эф}$

Ошибка
1,0 $\beta_{эф}$

ВК

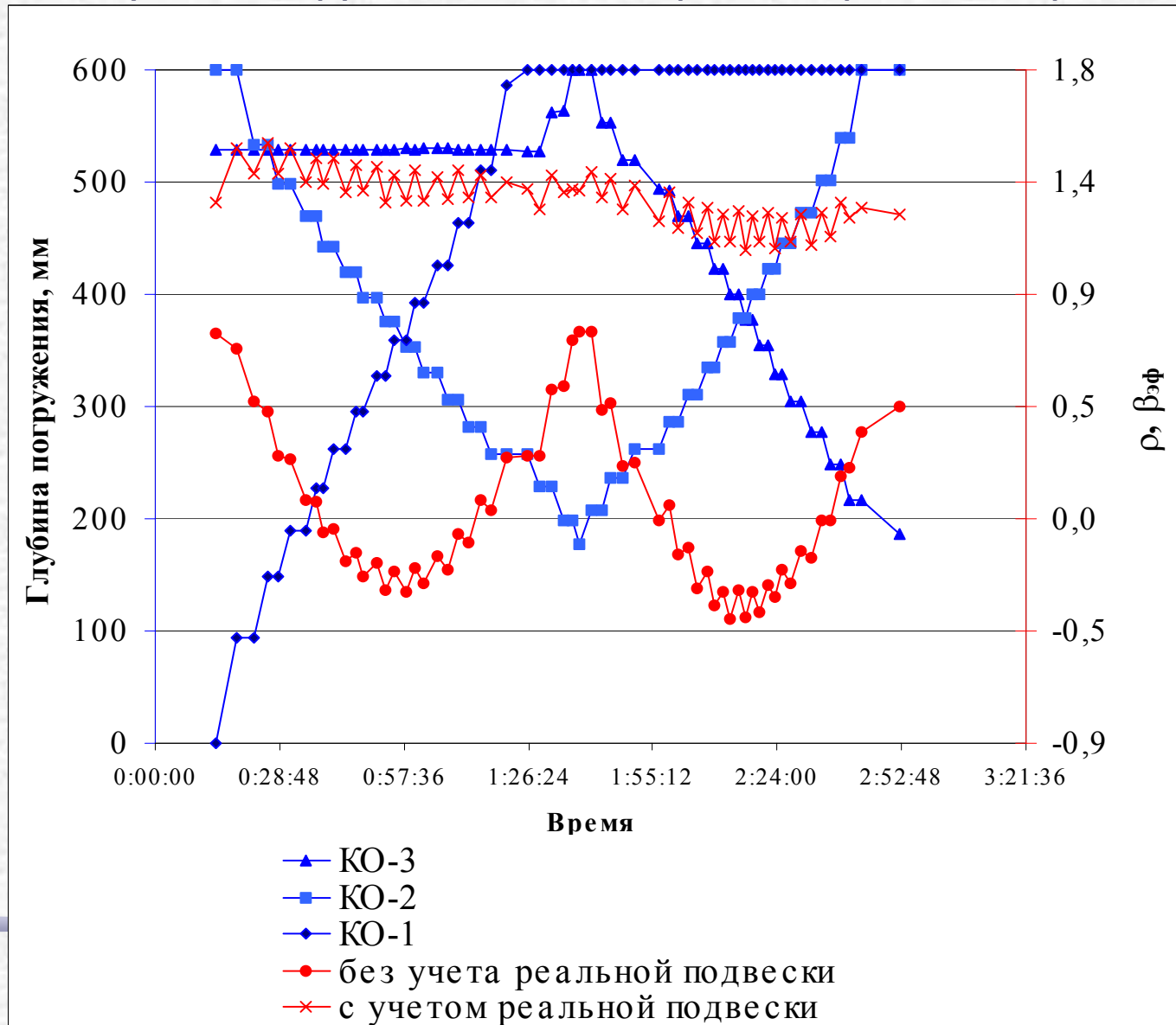
290мм

НК



Результаты расчета градуировки РО СУЗ при разном учете высоты подвески стержней

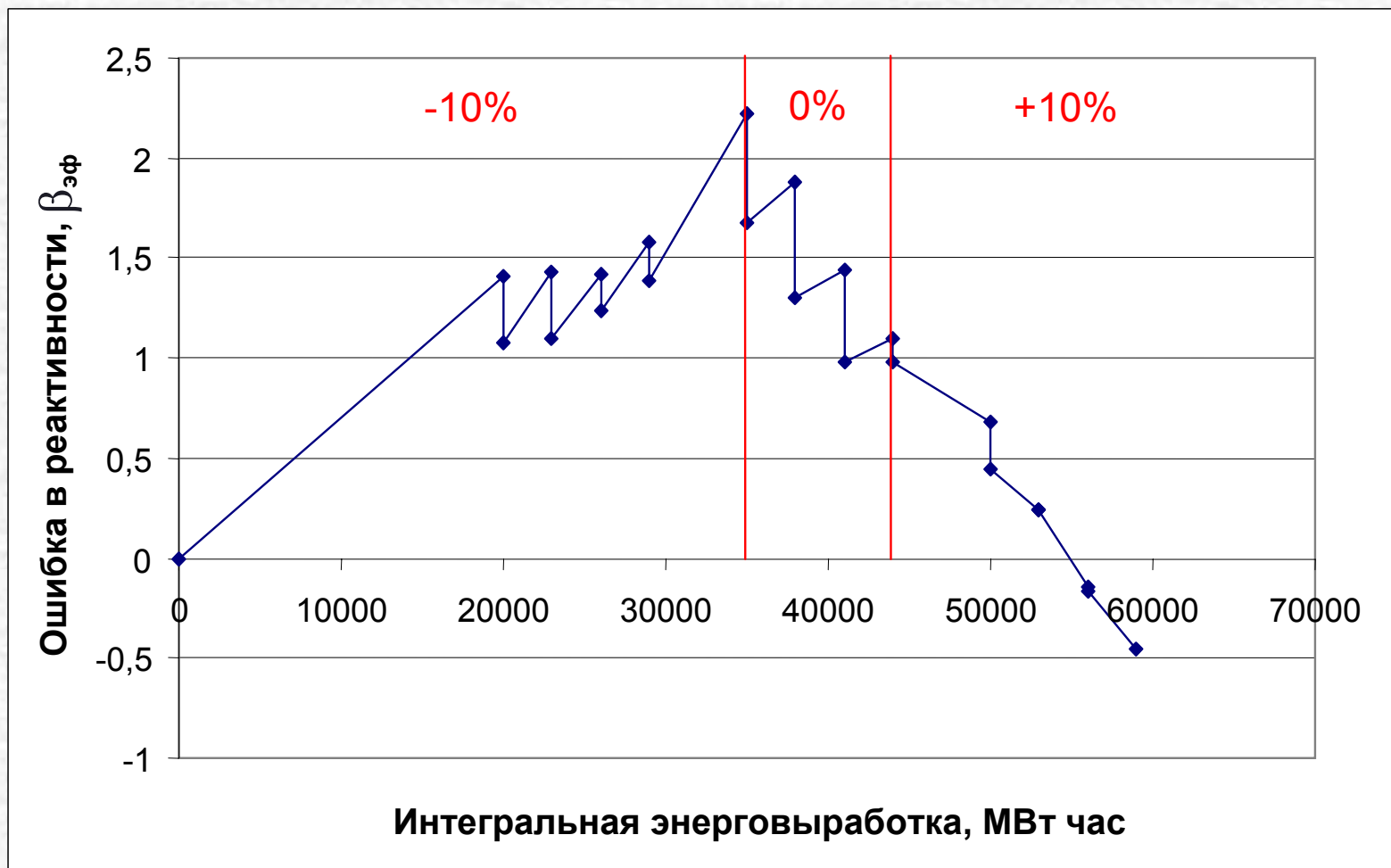
(синие линии- глубина погружения РО СУЗ, красные -расчетная реактивность)



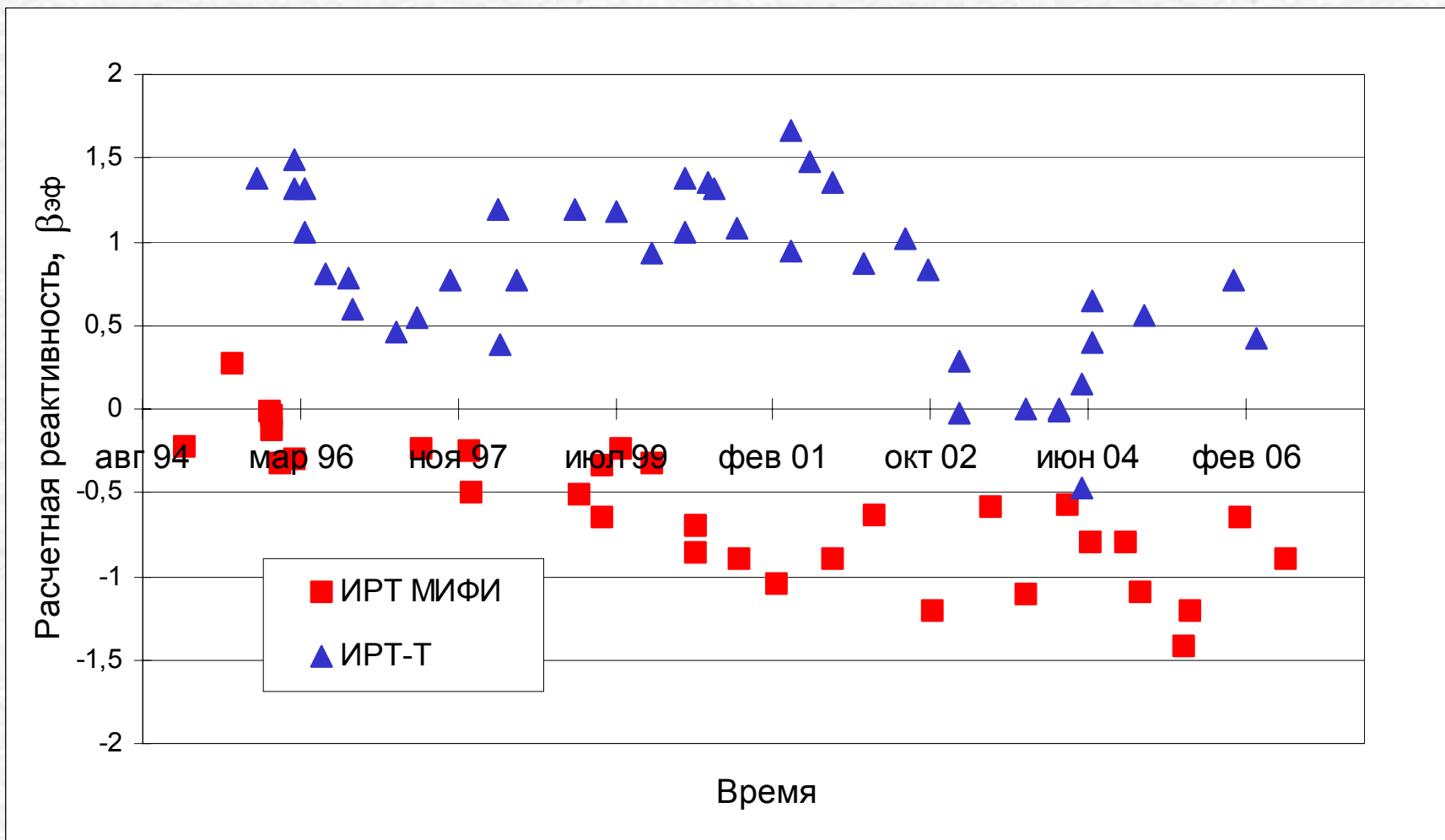
Разброс расчетной реактивности при моделировании градуировки рабочих органов СУЗ ИРТ МИФИ

Дата	Расчетная реактивность, $\beta_{эф}$		
	$\rho_{мин}$	$\rho_{макс}$	Разброс ($\rho_{макс} - \rho_{мин}$)
11.12.95	-0,59	-0,29	0,30
05.03.96	-0,66	-0,32	0,34
07.07.97	-0,34	-0,11	0,23
18.05.99	-0,71	-0,42	0,29
23.11.99	-0,50	-0,11	0,39
05.05.00	-0,99	-0,67	0,32
15.03.01	-1,42	-1,04	0,38
15.03.02	-0,94	-0,60	0,34
02.06.03	-0,92	-0,53	0,39
24.03.04	-0,81	-0,52	0,29
16.01.06	-0,92	-0,58	0,34

Расчет истории выгорания с «истинной» и «ошибочной» энерговыработкой. Влияние на запас реактивности



Результаты расчета экспериментальных критических состояний по программе TIGRIS



Определение запаса реактивности ρ_{\max}

Эксперимент: $\rho_{\max} = \rho_{\Sigma}^{\text{э}} + \Delta\rho^{\text{э}},$

где $\rho_{\Sigma}^{\text{э}}$ - сумма эффективностей погруженных частей РО СУЗ,
 $\Delta\rho^{\text{э}}$ - поправка на интерференцию.

Расчет: $\rho_{\max} = \rho_{\max}^{\text{р}} + \Delta\rho^{\text{м}}$ или $\rho_{\max} = \rho_{\Sigma}^{\text{р}} + \Delta\rho^{\text{р}} + \Delta\rho^{\text{м}},$

где $\rho_{\max}^{\text{р}}$ - результат расчета с извлеченными РО СУЗ,

$\Delta\rho^{\text{м}}$ - поправка на погрешность модели и неопределенности,

$\rho_{\Sigma}^{\text{р}}$ - сумма расчетных эффективностей погруженных частей РО СУЗ,

$\Delta\rho^{\text{р}}$ - поправка на интерференцию.

$$\Delta\rho^{\text{р}} = \rho_{\max}^{\text{р}} - \rho_{\Sigma}^{\text{р}} \quad \Rightarrow \quad \rho_{\max} = \rho_{\Sigma}^{\text{э}} + \Delta\rho^{\text{р}}$$

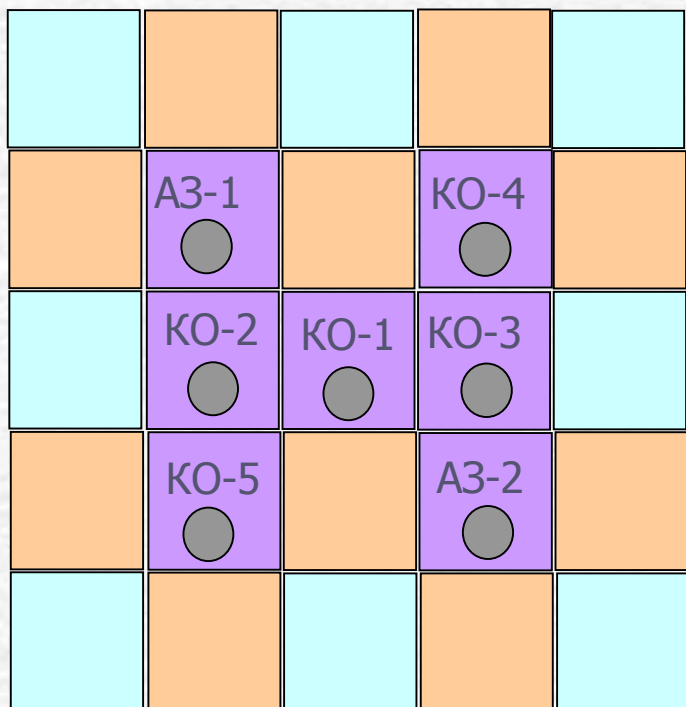
Запас реактивности ИРТ МИФИ

Дата	Запас реактивности, $\beta_{эф}$			
	Эксперимент	По расчетным кривым	Расчет без стержней	Поправка
07.07.97	5,2	5,1	5,3	0,2
18.05.99	7,8	7,4	6,6	-0,8
23.11.99	5,9	5,6	5,5	-0,1
10.05.00	6,8	6,7	6,3	-0,4
23.10.00	6,3	5,6	5,6	0
09.10.01	6,1	5,0	4,9	-0,1
15.03.02	9,3	8,0	7,1	-0,9
28.10.02	7,4	6,3	6,0	-0,3
02.06.03	6,7	6,3	6,3	0
14.10.03	6,5	5,8	5,8	0
24.03.04	8,5	8,6	7,9	-0,7
16.01.06	8,8	8,8	8,0	-0,8

Различие экспериментальной и расчетной эффективности РО СУЗ ИРТ МИФИ

Дата	(Расчет-эксперимент)/эксперимент, %						
	A3-1	A3-2	A3-3	AP	КС-1	КС-2	КС-3
07.07.97	0	-10	-4	5	6	3	3
05.01.98	-5	-5	-3	4	-1	-2	-4
18.05.99	0	-8	-1	3	3	-1	0
23.11.99	7	-6	5	5	-4	-1	-2
10.05.00	-3	-6	-3	6	8	10	7
15.03.01	-2	-7	-3	4	-6	-10	-9
15.03.02	-3	-8	-8	1	-2	-7	-6
02.06.03	-4	-6	-4	13	7	6	4
24.03.04	-5	-6	-4	11	7	8	6
16.01.06	-5	-6	0	15	5	5	3

ИРВ-М2. Расчет веса КО-1



AP 

Разброс 12%

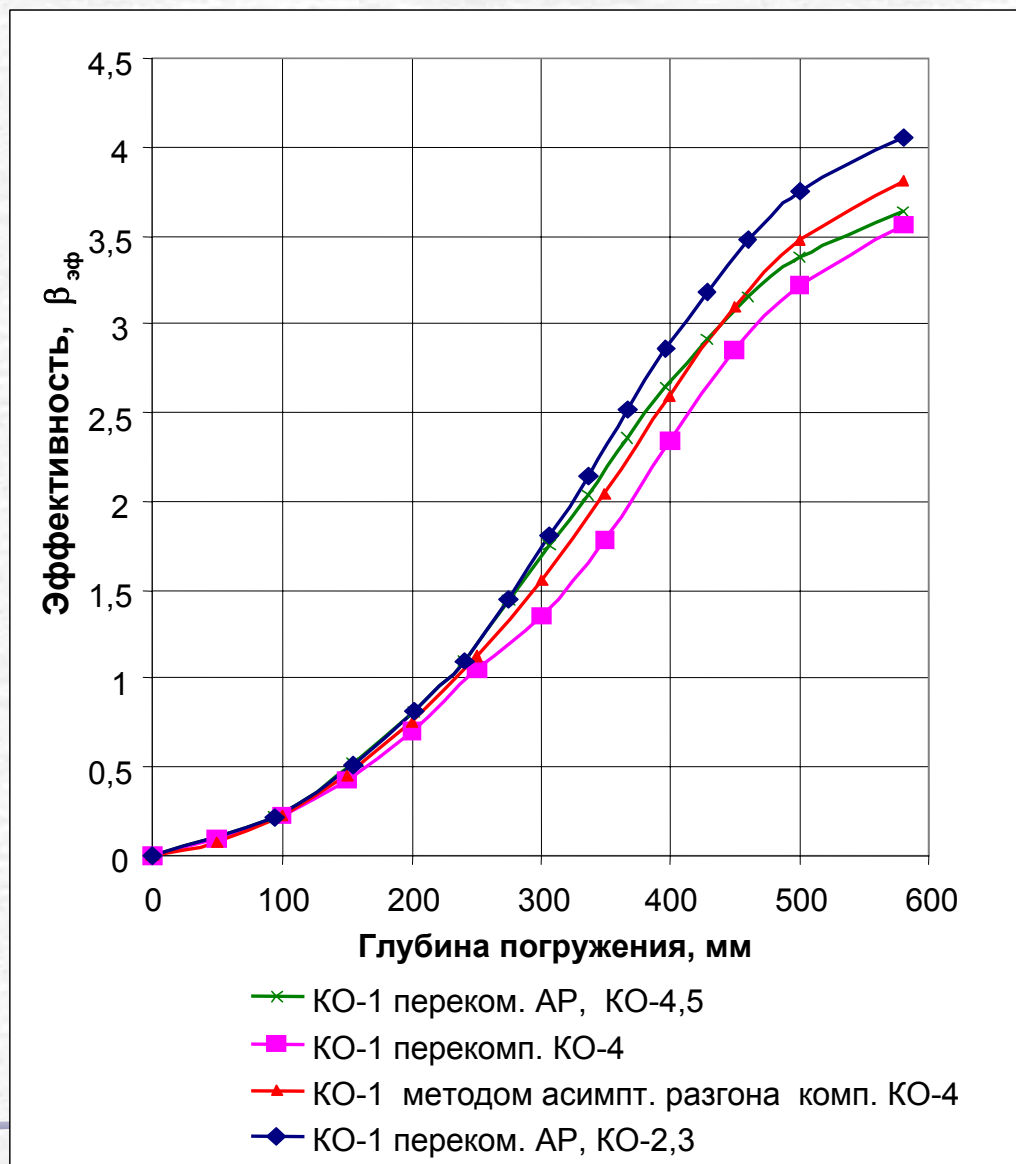
Способ расчета	Вес, $\beta_{эф}$
Два состояния (КО-2,3,4,5, AP, АЗ извл.)	3,81
Два состояния (КО-2,3,4,5, AP погр., АЗ извл.)	3,76
Градуировка перекомпенсацией с AP (компенсация КО-4,5)	3,64
Градуировка перекомпенсацией с AP (компенсация КО-2,3)	4,06
Градуировка перекомпенсацией с КО-4	3,56
Градуировка методом асимптотического разгона (компенсация КО-4)	3,81

 - ТВС

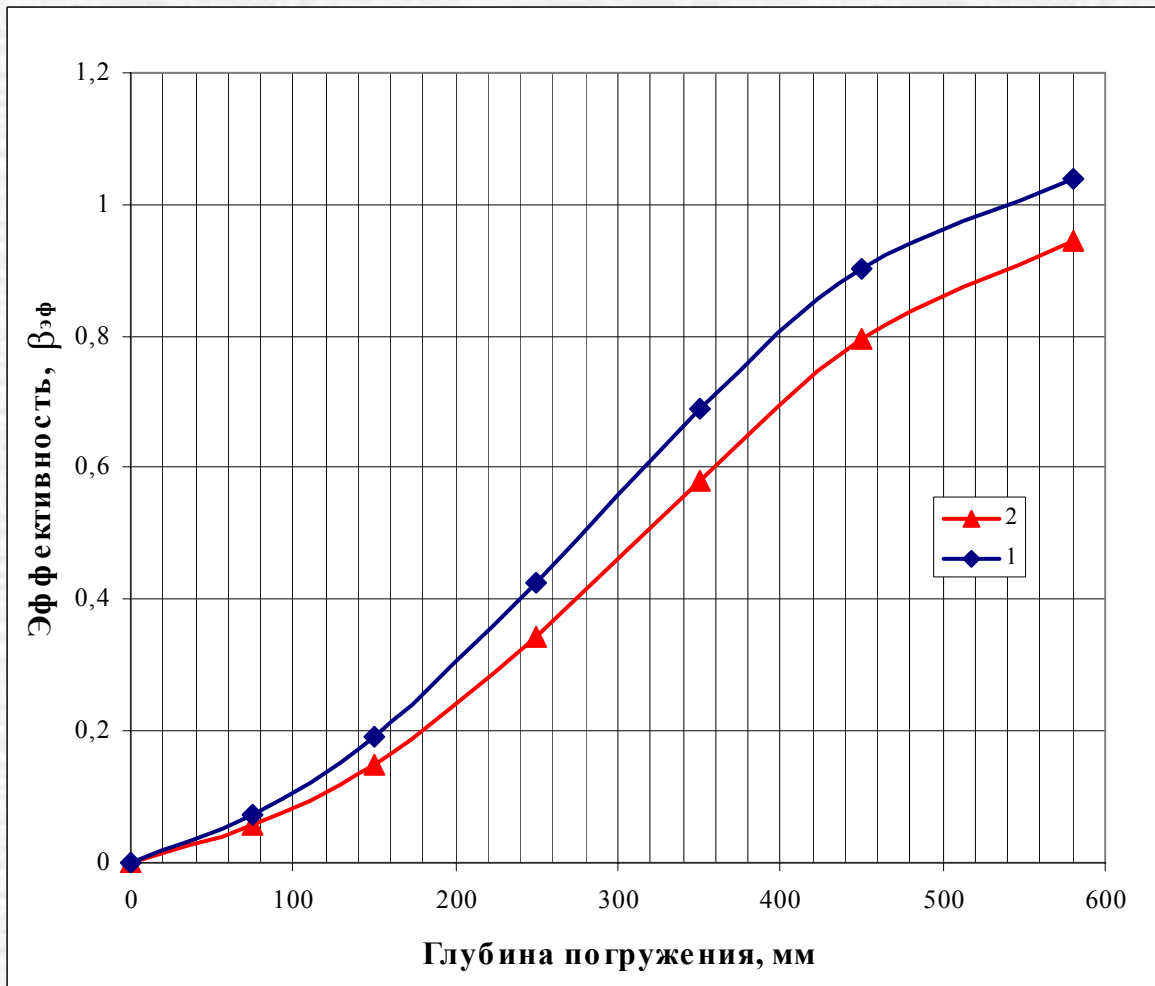
 - ТВС со стержнем СУЗ

 - AI

Расчетные кривые эффективности КО-1

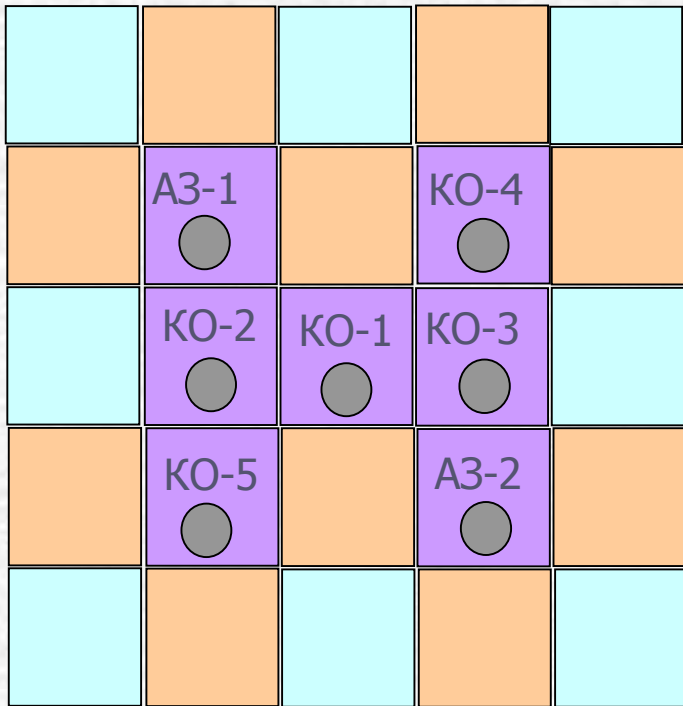


Расчетные кривые эффективности АР



1- компенсация КО-4, КО-1,2,3=НК, КО-5=ВК),
2- компенсация КО-4, КО-1=НК, КО-2,3,5=385 мм)

ИРВ-М2. Расчет веса КО-2



AP 

Разброс 15%

Способ расчета	Вес, $\beta_{эф}$
Два состояния (КО-1,3,4,5,AP, A3 извл.)	2,96
Два состояния (КО-1,3,4,5,AP погр., A3 извл.)	3,25
Градуировка перекомпенсацией с AP (компенсация КО-3)	3,13
Градуировка методом асимптотического разгона (компенсация КО-3)	3,23
Градуировка перекомпенсацией с КО-4	3,48

 - ТВС

 - ТВС со стержнем СУЗ

 - AI

Паспортные характеристики программы TIGRIS

Расчетный параметр, ед. изм.	Погрешность
Реактивность для экспериментального критического состояния (неотравленное состояние или состояние стационарного отравления), $\beta_{эф}$	$\pm 2,0$
Запас реактивности, $\beta_{эф}$	$\pm 2,0$
Стационарное отравление, $\beta_{эф}$	$\pm 0,5$
Изменение реактивности при перегрузке, $\beta_{эф}$	$\pm 0,5$
Разброс реактивности при перемещении групп стержней (перекомпенсации) для одной и той же загрузки активной зоны, $\beta_{эф}$	0,4
Интегральная эффективность 1-го стержня АЗ, %	± 20
Интегральная эффективность стержней АЗ, %	± 10
Интегральная эффективность стержня АР, %	± 15
Интегральная эффективность стержней КС, %	± 10
Глубина выгорания ТВС (более 20%), % (относительные)	± 10
Распределение энерговыделения, %	± 20

Окно задания данных программы TIGRIS

Картограмма

Список составов

с 1 по 19 | с 20 по 38

1	H2O
2	FUEL8BE
3	PB54-H
4	BE-H
5	BEOM-H
6	BELP3_2
7	BELP-H
8	FUEL6
9	FUEL6BE
10	FUEL6RBE
11	FUEL6KBE
12	FUEL6R4
13	FUEL6K
14	BEML3
15	CHAN3
16	AL_D25
17	AL-40BE
18	FUEL4_38
19	

Операции со списком составов:

Добавить новый состав

Удалить состав

IX--> КАРТОГРАММА

IX	3	4	5	6	7	8	9	10
4	1	4	4	4	5	4	4	3
5	6	7	2	9	2	9	5	1
6	7	6	9	8	8	2	4	5
7	14	14	2	8	8	9	4	4
8	14	14	2	9	2	9	4	4
9	15	15	16	15	15	15	17	4

Число высотных слоев: 8

А.з. с 2 по 7 слой

Слой по высоте

1
2
3
4
5
6
7
8

Переклю­чат­ель вида картограммы активной зоны

Картограмма активной зоны

Картограмма стержней

Картограмма выгорания

Картограмма исх. массы U-235

Вставить слой

Удалить слой

Скопировать слой

Положение картограммы активной зоны на полной картограмме

IX с 3 по 10

IY с 4 по 9

Переклю­чат­ель вида картограммы

Полная картограмма расчета

Картограмма активной зоны

Операции с ячейками на картограмме:

Выгрузить в корзину | Загрузить из корзины | Очистить | Очистить во всех слоях

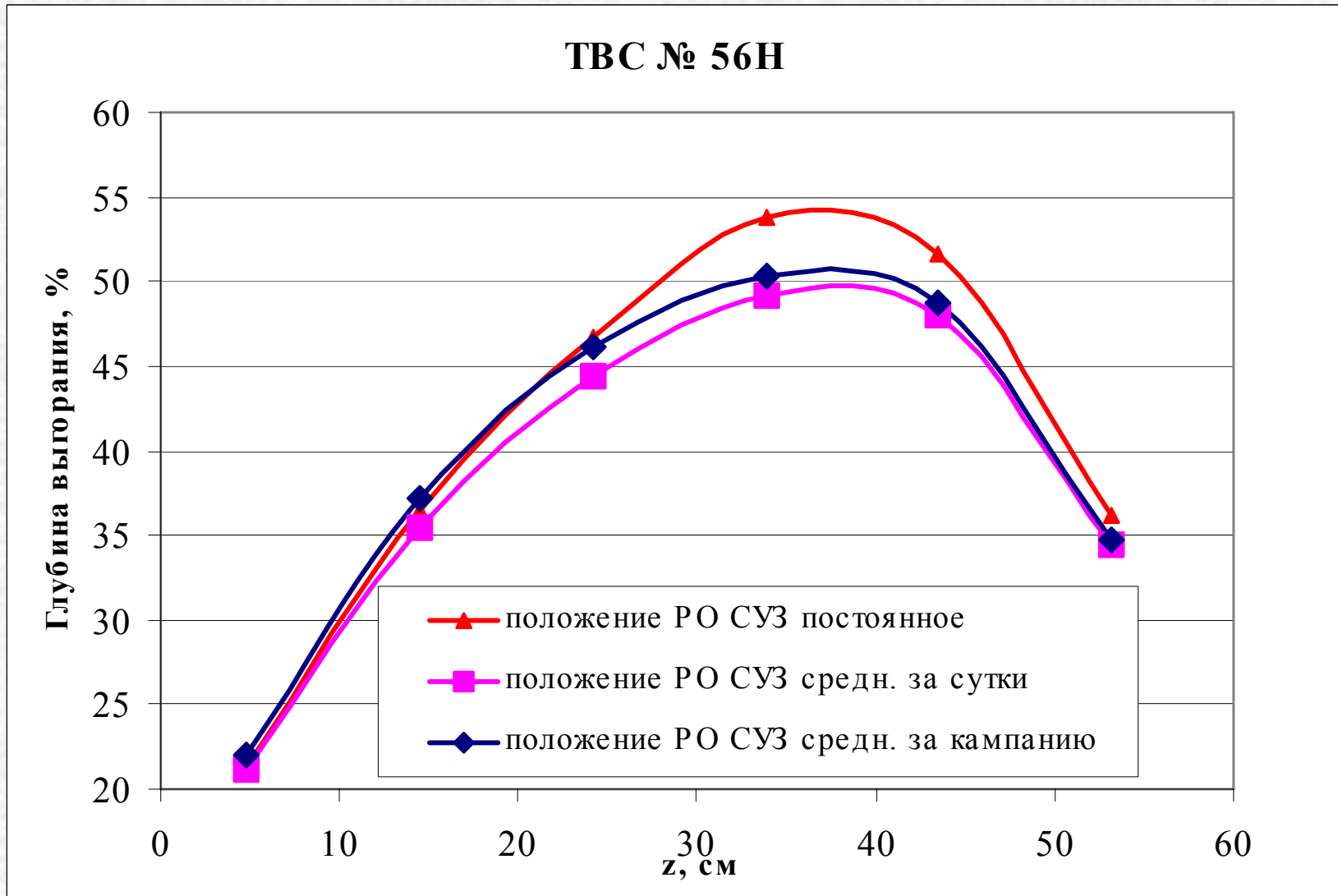
Положение РО СУЗ | Корзина перегрузки

Стержень №	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8	№ 9	№ 10
Глубина погружения, мм	93	231	600	600	0	0	0	0	93	0

Глубина погружения стержней в группе одинакова

Группа Стержни	Группа Стержни
№1	8,10
№2	1,9
№3	3,4
№4	2,
№5	
№6	
Очередность групп	1,2,3,4

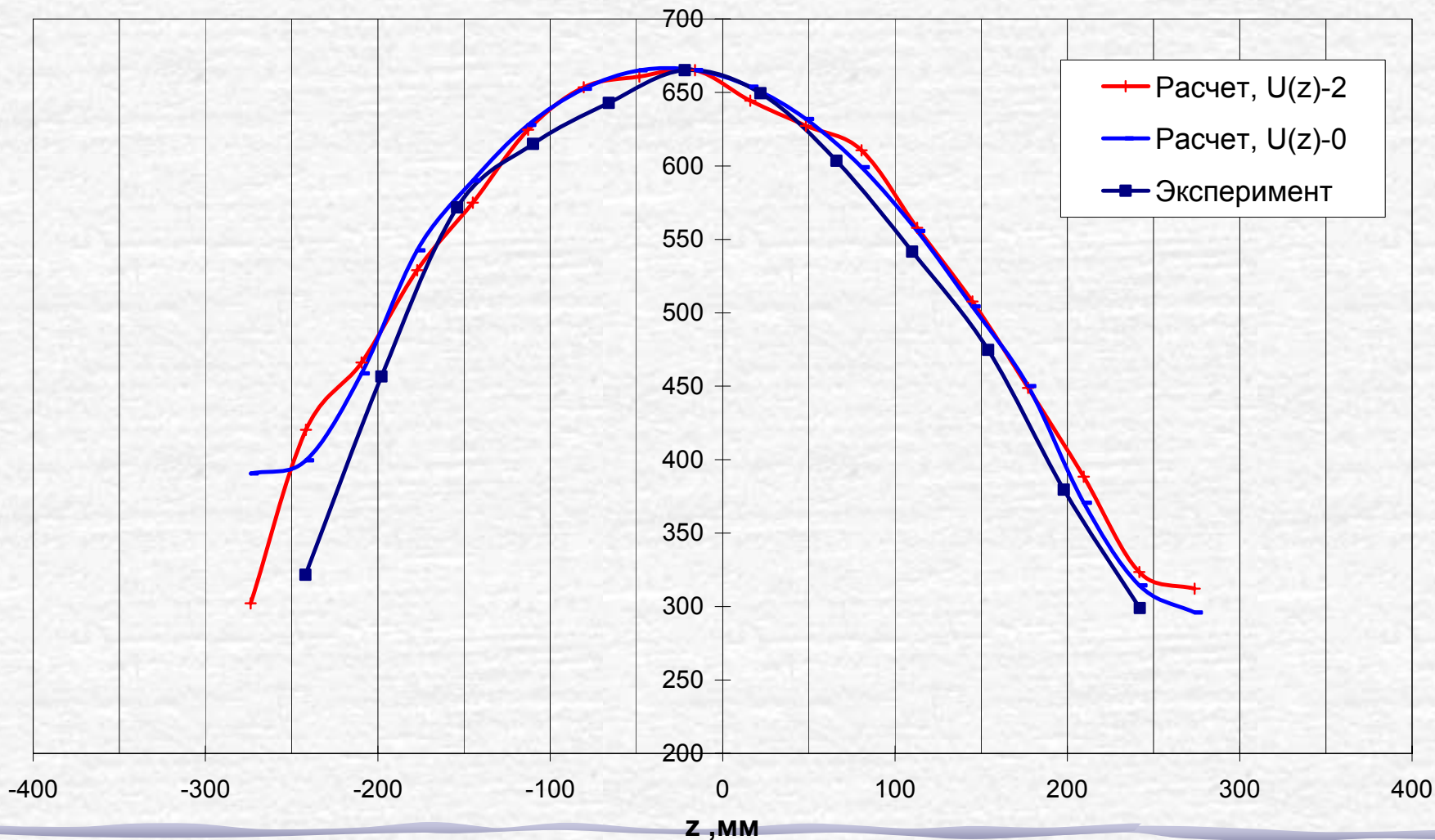
Расчетное распределение выгорания



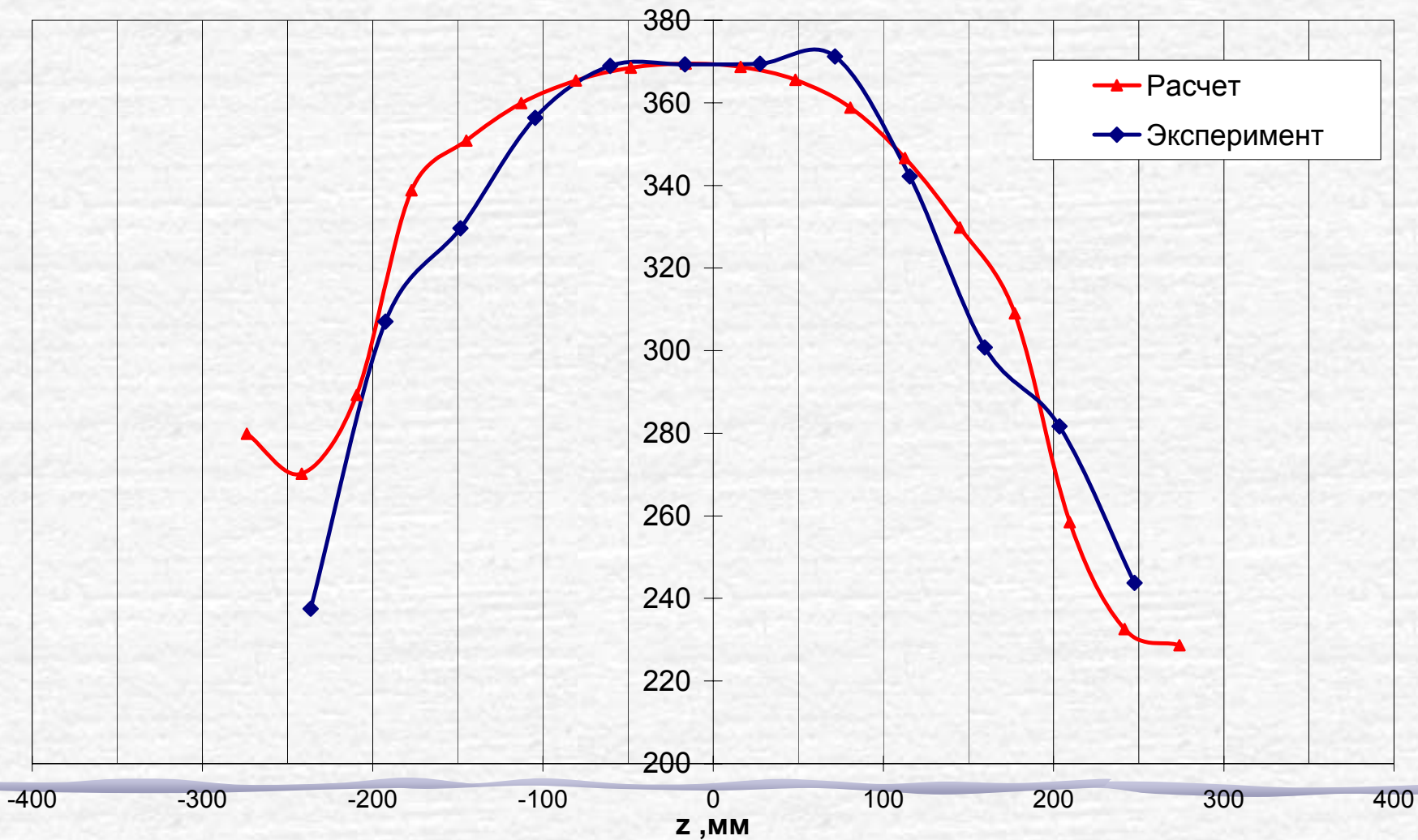
Расчетное и экспериментальное выгорание

№ ТВС	Среднее по ТВС выгорание, %			Максимальное по ТВС выгорание, %		
	Эксп.	Расчет	Откл.	Эксп.	Расчет	Откл.
183	47,2±0,4	51,4	+4,2	57,9 ± 0,9	63,3	+5,4
126	50,8 ± 0,5	50,8	0	58,5 ± 1,5	60,4	+1,9
127	49,3 ± 0,7	49,6	+0,3	57,5 ± 1,6	61,6	+4,1

Распределение относительного энерговыделения по высоте ТВС №147 (выгорание 0%)



Распределение относительного энерговыделения по высоте ТВС №127 (выгорание 52%)



Влияние накопления He-3 в бериллиевом отражателе на реактивность

Ядерные реакции, приводящие к образованию Li-6, H-3 и He-3 :



Микросечения реакций:

$$\sigma_{Be}^{(n,\alpha)} = 0,0429 \text{ б}$$

$$\sigma_{Li}^{(n,T)} = 775 \text{ б}$$

$$\sigma_{He}^{(n,p)} = 4397 \text{ б}$$

Уравнения, описывающие изменение ядерных концентраций Li-6, H-3 и He-3 во времени:

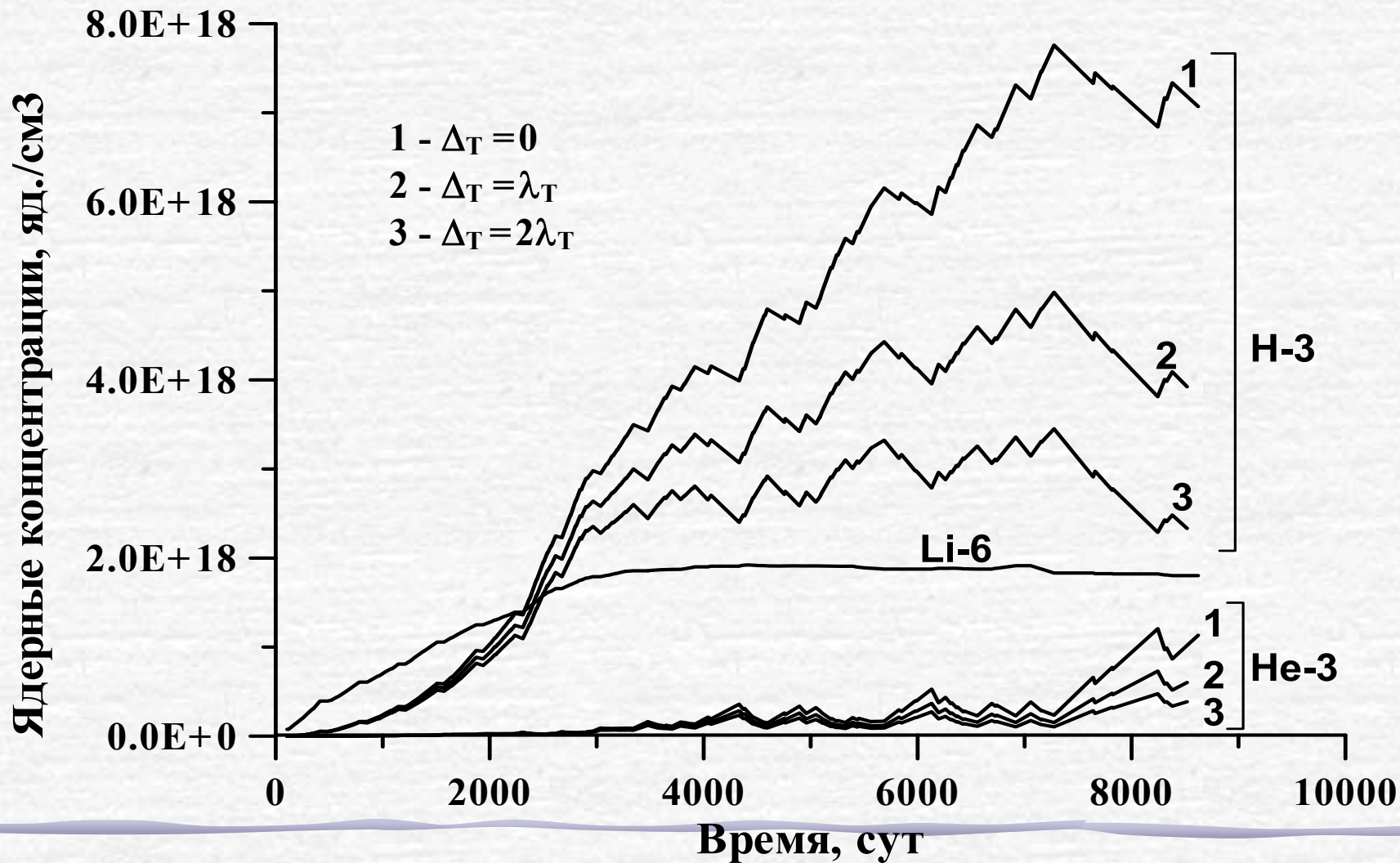
$$\frac{dN_{Li}}{dt} = N_{Be} \sigma_{Be}^{(n,\alpha)} \Phi - \sigma_{Li}^{(n,T)} \Phi^4 N_{Li}$$

$$\frac{dN_T}{dt} = N_{Li} \sigma_{Li}^{(n,T)} \Phi^4 - (\lambda_T + \Delta_T) N_T + \sigma_{He}^{(n,p)} \Phi^4 N_{He}$$

$$\frac{dN_{He}}{dt} = \lambda_T N_T - (\sigma_{He}^{(n,p)} \Phi^4 + \Delta_{He}) N_{He}$$

$$N_{Li}(t_0) = N_{Li}^0 \quad N_T(t_0) = N_T^0 \quad N_{He}(t_0) = N_{He}^0$$

Зависимость от времени ядерных концентраций Li-6, H-3 и He-3 в бериллиевых блоках при разных скоростях ухода H-3 за счет диффузии



Определение параметра ΔT

Два состояния активной зоны с одинаковой нагрузкой:
05.01.98 ($t=7824$ сут) и 22.02.99 ($t=8244$ сут)

