

***О ВЛИЯНИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ  
УСТРОЙСТВ НА ФИЗИКУ И БЕЗОПАСНОСТЬ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РЕАКТОРОВ***

***XIII ЕЖЕГОДНОЕ РОССИЙСКОЕ СОВЕЩАНИЕ  
«БЕЗОПАСНОСТЬ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК»***

***А.П. Малков  
ОАО «ГНЦ НИИАР»***

Отличием ИР от других типов ЯР является наличие экспериментальных устройств. ЭУ и режимы испытаний могут оказывать значительное влияние на основные нейтронно-физические характеристики ИР:

- эффективность органов СУЗ,
- запас реактивности,
- знак и величина обратных связей по реактивности,
- подкритичность реактора с введенными РО СУЗ,
- эффекты реактивности при перегрузке активной зоны,
- коэффициенты неравномерности энерговыделения в активной зоне,

вплоть до изменения основных проектных и паспортных характеристик реакторов.

**Анализ опубликованной информации по влиянию ЭУ на НФХ исследовательских реакторов показал ее недостаточность для научно-методического обоснования и аргументированной трактовки нормативных требований по безопасности, как по объему, так и по качеству представленных результатов.**

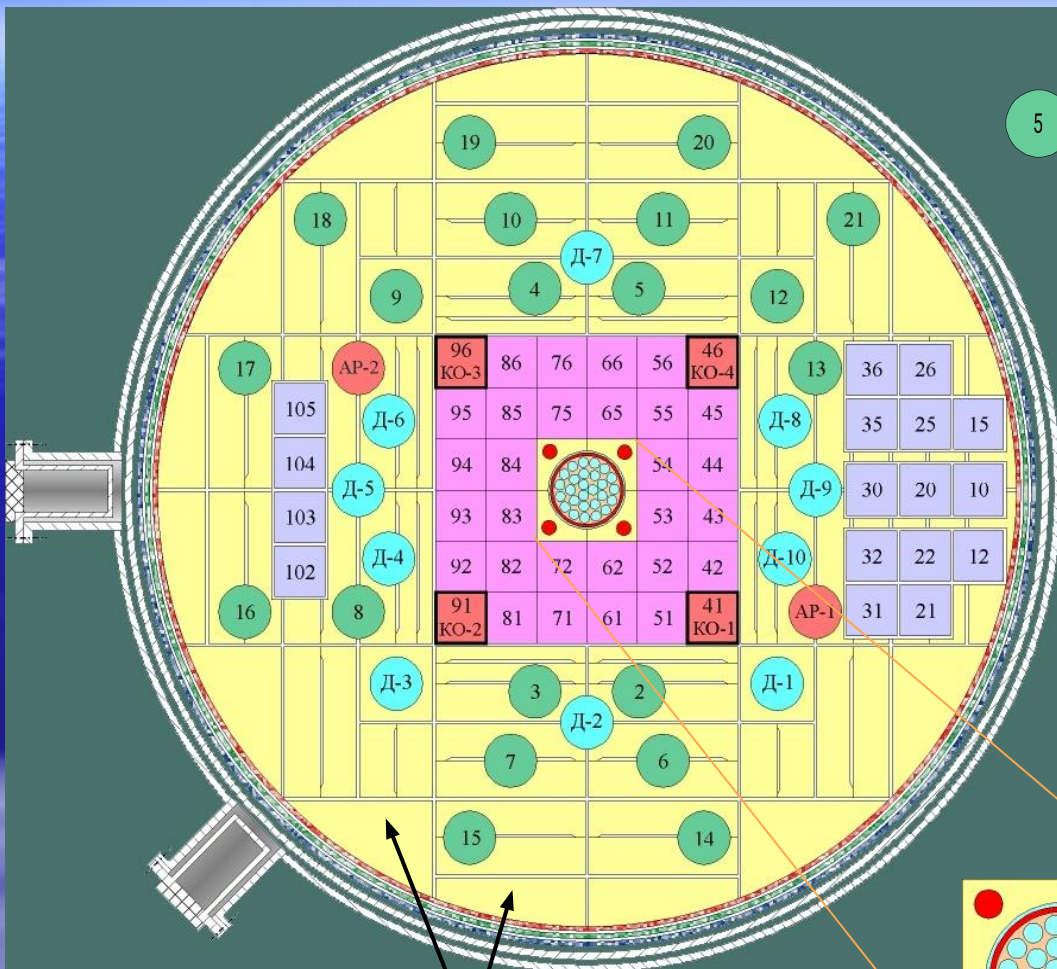
**Это определяет необходимость выполнения системных исследований в обоснование безопасности эксплуатации ИР с различными типами ЭУ.**

**Масштаб и характер влияния ЭУ на НФХ ИР зависит от:**

- типа и характеристик самого реактора;**
- конструкции и материального состава ЭУ и облучаемых материалов;**
- места размещения ЭУ в реакторе;**
- режима испытания (стационарный или динамический);**
- режима работы реакторной установки;**
- наличия в реакторе других ЭУ и необходимости согласования и обеспечения условий совместного испытания различных ЭУ;**
- сценариев развития постулируемых нарушений нормальной эксплуатации.**

**Влияние ЭУ на НФХ ИР проанализировано расчетно-экспериментальным путем для реакторов различного типа**

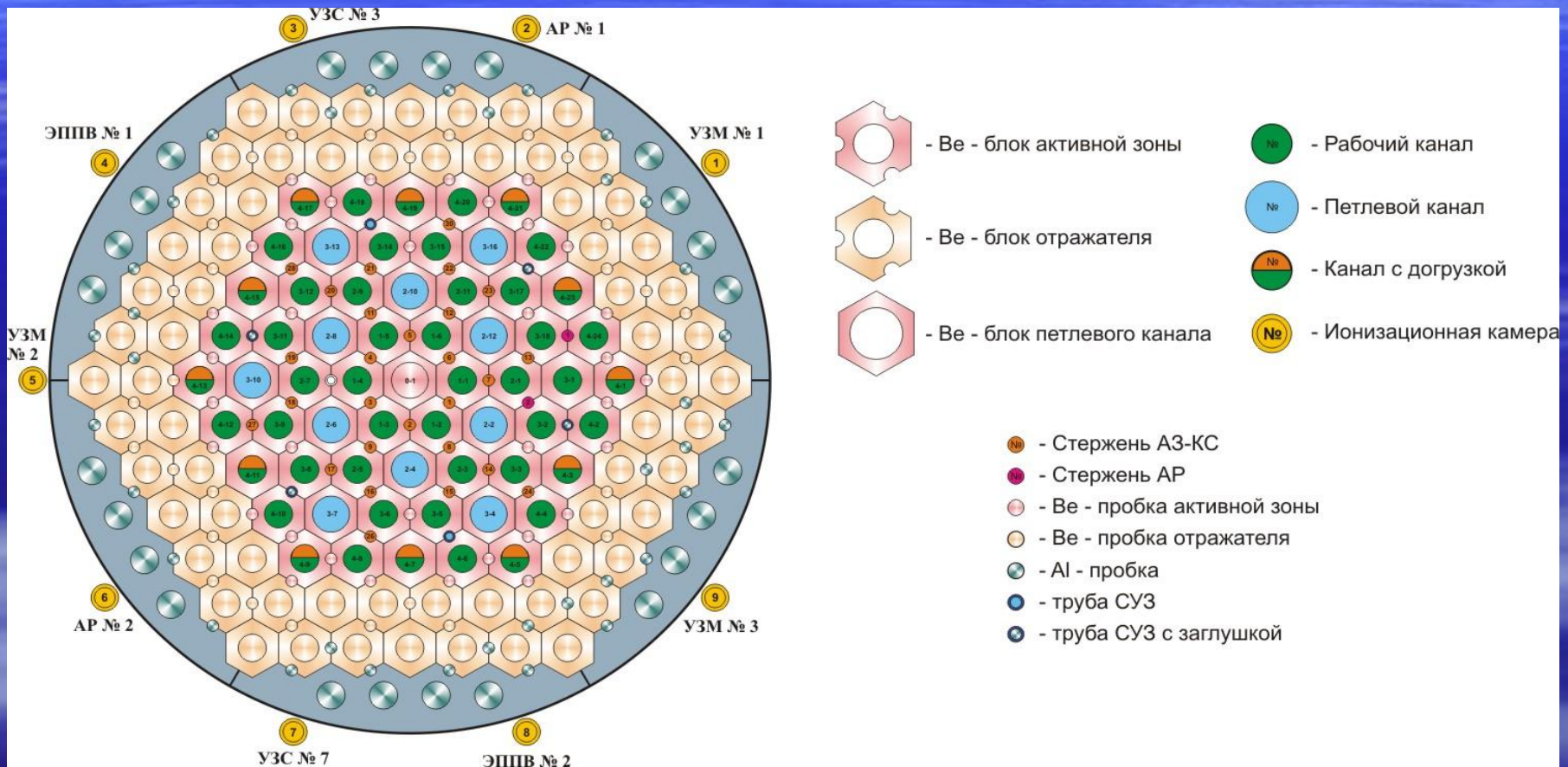
# Картограмма активной зоны реактора СМ



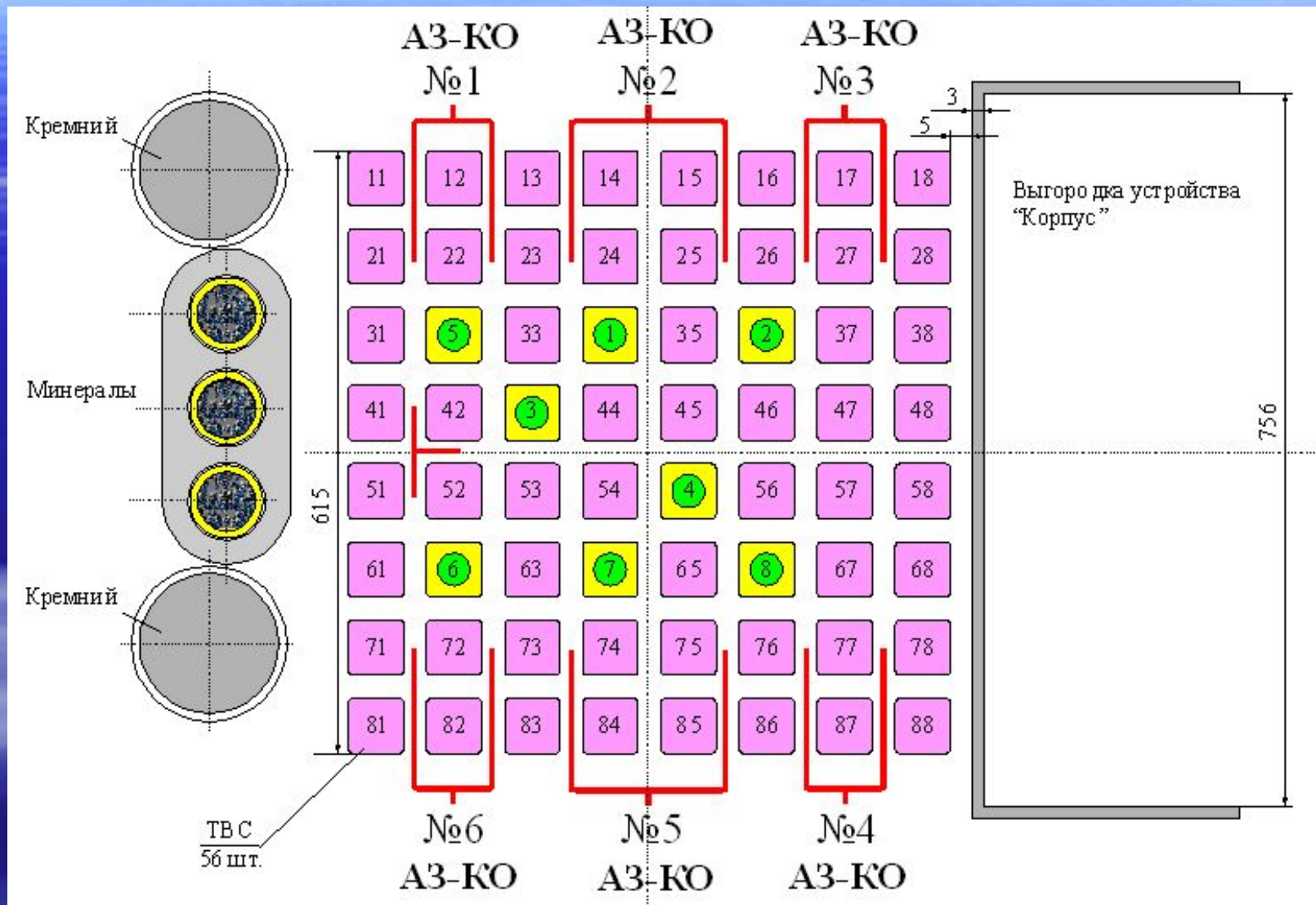
- 5 ○ Д-1 Канал и его номер
- 41 КО-1 Компенсирующий орган
- АР-1 Рабочий орган АР
- 61 Ячейка активной зоны с ТВС
- ● Рабочий орган АЗ в бериллиевом вкладыше
- Сепараторный блок
- Центральный компенсирующий орган

Бериллиевые блоки отражателя

# Картограмма активной зоны реактора МИР

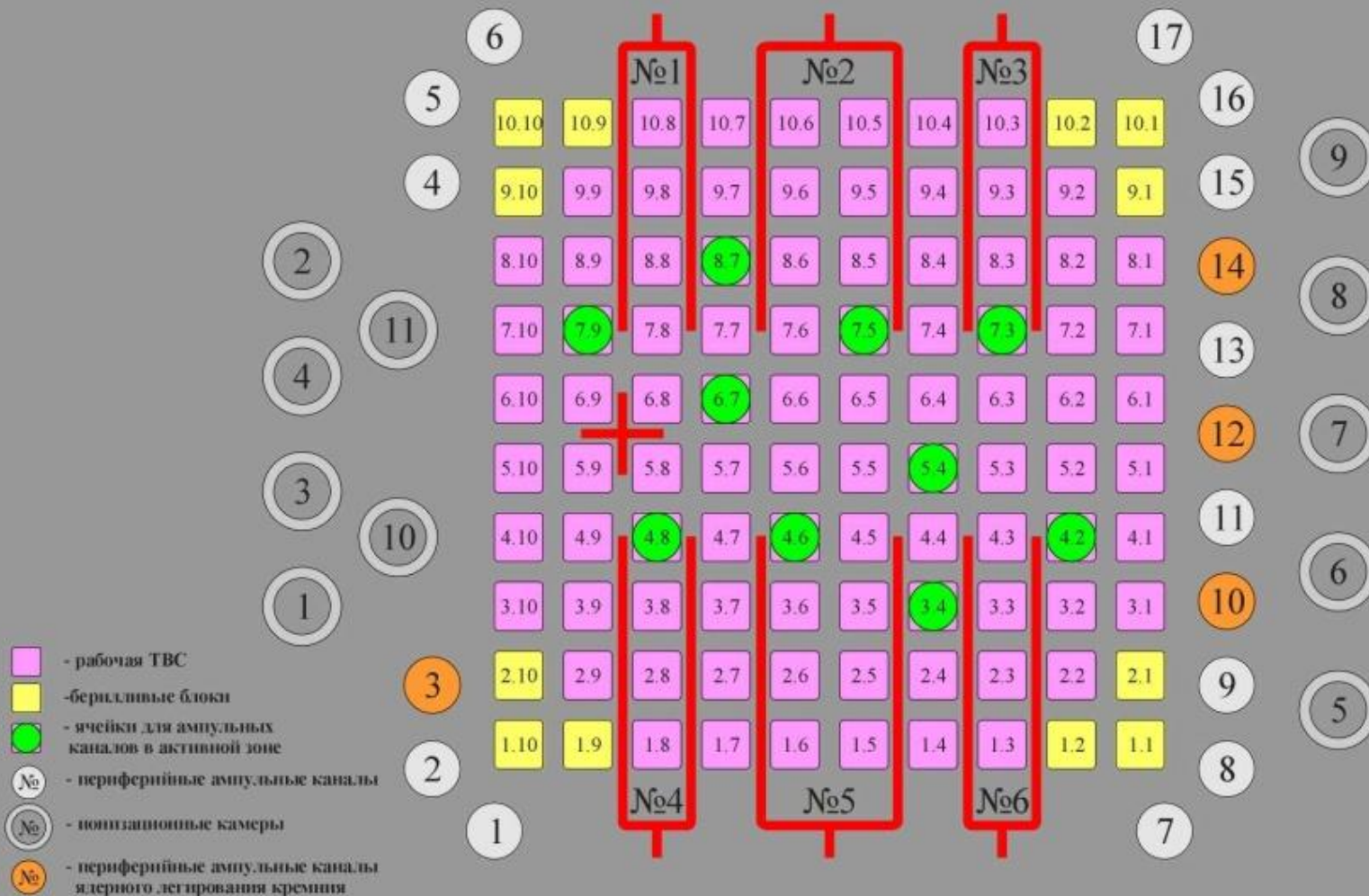


# Картограмма активной зоны реактора РБТ-6



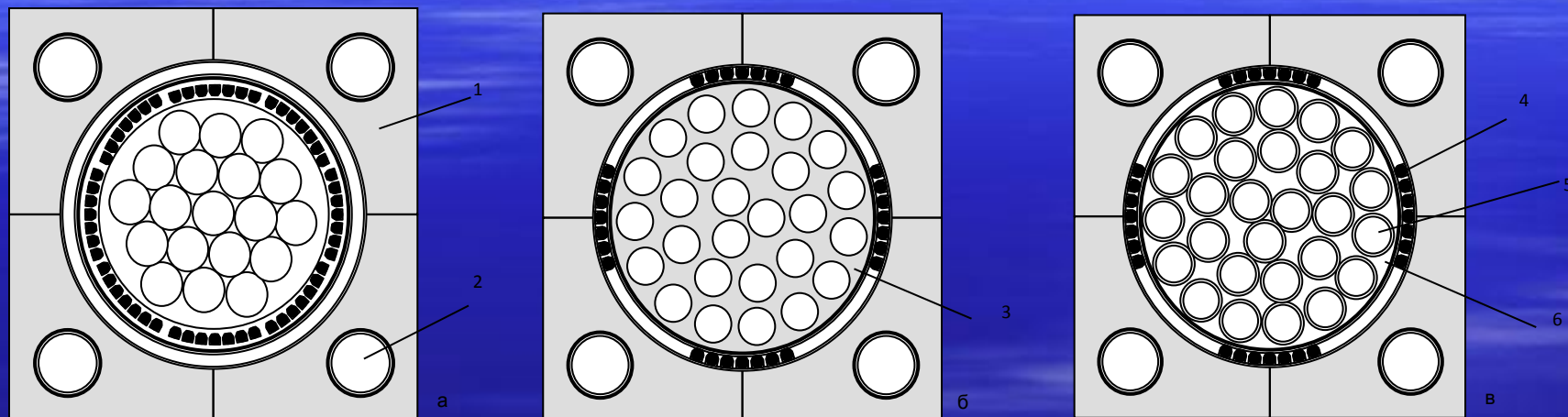
# Картограмма активной зоны реактора РБТ-10

Активная зона реактора РБТ-10/2



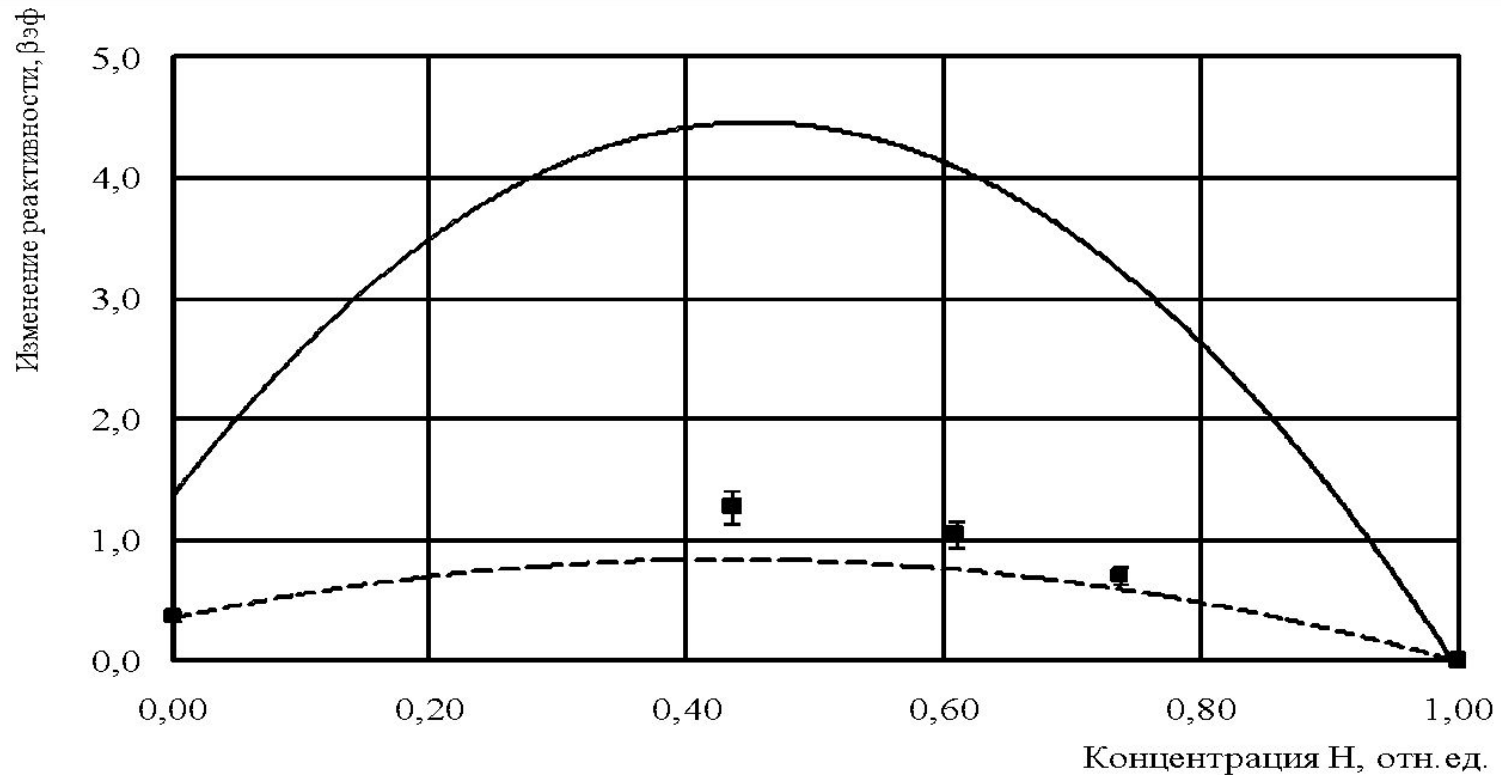


# Влияние компоновки нейтронной ловушки на НФХ высокопоточного ИР



Сечение нейтронной ловушке реактора СМ с петлевым каналом (а), с центральным Ве-блоком (б) и сепаратором (в):  
1 – фигурный бериллиевый вкладыш; 2 – стержень АЗ; 3 – центральный бериллиевый блок;  
4 – поглотитель ЦКО; 5 – трубы сепаратора; 6 – вода.

## Зависимость реактивности от концентрации водорода в центральном канале реактора СМ



\_\_\_\_\_ результаты из [4],

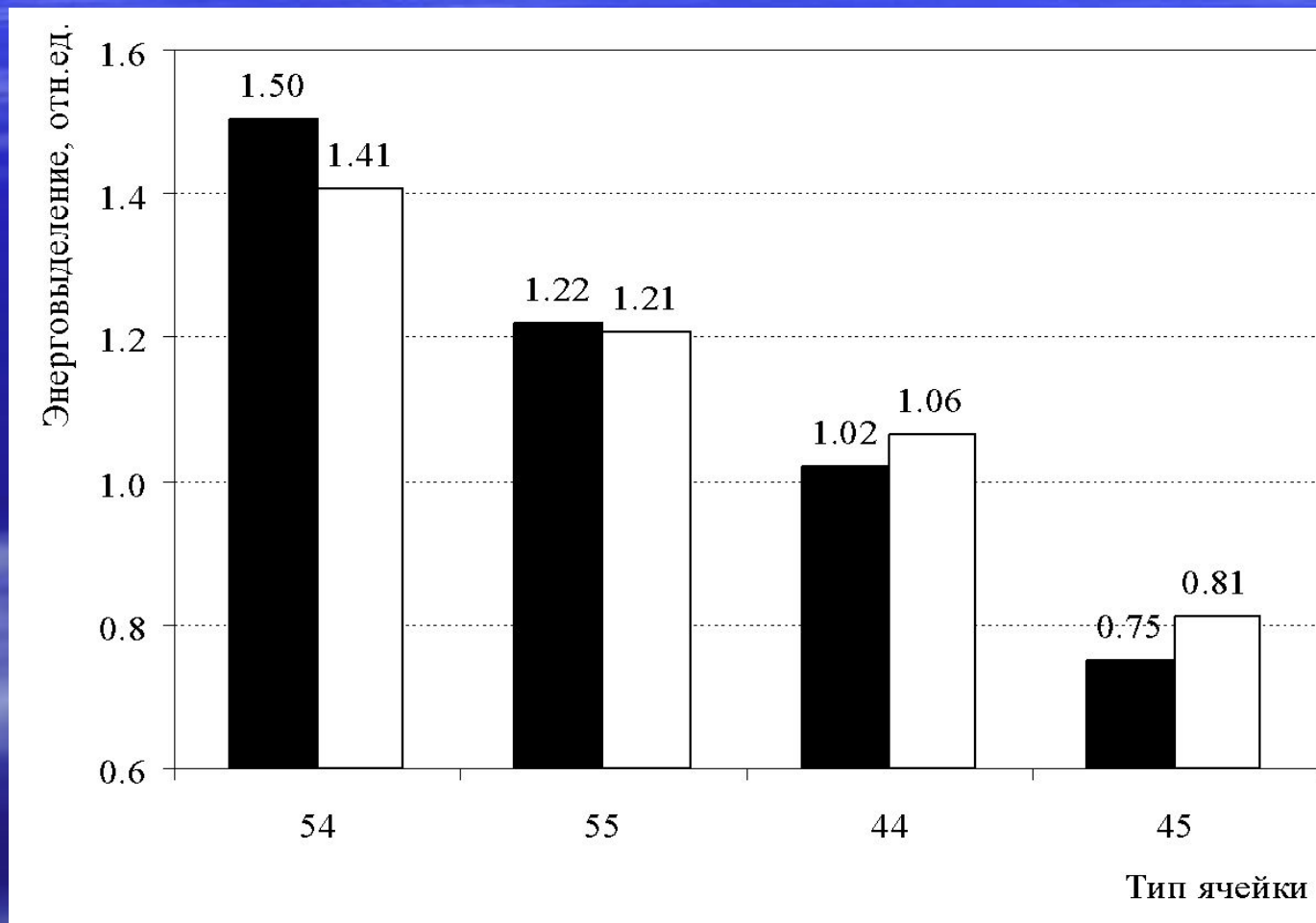
- экспериментальные данные для углеводородных жидкостей,

----- расчетные данные для пароводяной смеси.

# Основные НФХ реактора СМ с различными вариантами компоновки нейтронной ловушки

Параметр	Канал	Ве -блок	Сепаратор
Максимальная плотность потока тепловых нейтронов, $m^{-2}s^{-1}$	$2,6 \times 10^{19}$	$1,7 \times 10^{19}$	$2,5 \times 10^{19}$
Эффект реактивности, $\beta_{эфф}$	0	+1,5	+0,2
Температурный эффект реактивности (от 15 °С до 70 °С), $\beta_{эфф}$	-0,33	- 0,65	- 0,56
Мощностной коэффициент реактивности, $10^{-5}(\Delta k/k)/\%N_{ном}$	-4,5	- (3±1)	- (3± 1)
Коэффициент неравномерности энерговыделения по:			
высоте активной зоны	1,25	1,25	1,25
сечению активной зоны	1,65	2,16	1,88
сечению ТВС, граничащей с ловушкой	2,92	2,06	2,27
объему активной зоны	6,0	5,60	5,33
Эффективность, $\beta_{эф}$ :			
стержня аварийной защиты;	0,59	0,5 - 1,5	0,4 – 1,5
центрального компенсирующего органа;	4,09	3,0 - 4,5	2,5 – 4,5
компенсирующего органа;	2,04	1,3 - 3,5	1,3 – 3,5
автоматического регулятора	0,05	0,01 - 0,4	0,01 - 0,4

# Энерговыделение в типовых ячейках реактора СМ с бериллиевым блоком (■) и сепаратором (□)



## Усредненные параметры реактора СМ, связанные с использованием топлива

Год	Среднее выгорание топлива, %		Среднее выгорание в выгружаемых ТВС, %	Расход свежих ТВС на выработку 1000 МВт×сут
	начало кампании	конец кампании		
2000	16,6	21,0	35,4	4,13
2001	16,2	20,5	34,97	4,25
2002 (с Ве-блоком)	16,5	20,6	35,4	4,44
2002 (с сепаратором)	14,2	18,7	31,1	4,62
2003	14,9	18,8	31,2	4,87
2004	15,3	19,1	31,3	4,60

## ЭУ в активной зоне

### Для реактора СМ:

- ТВС с экспериментальными каналами;
- Устройства в объеме ТВС;
- Петлевые каналы для облучения материалов

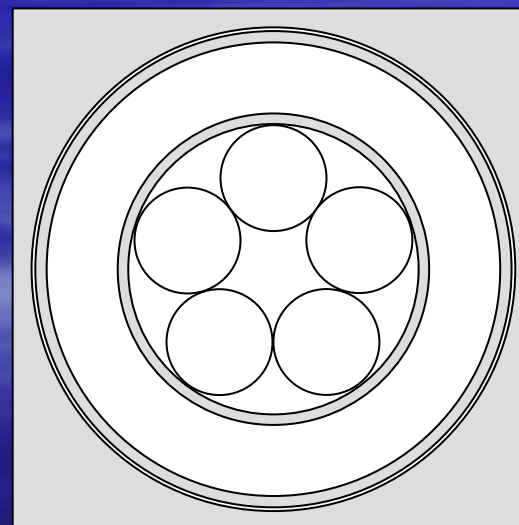
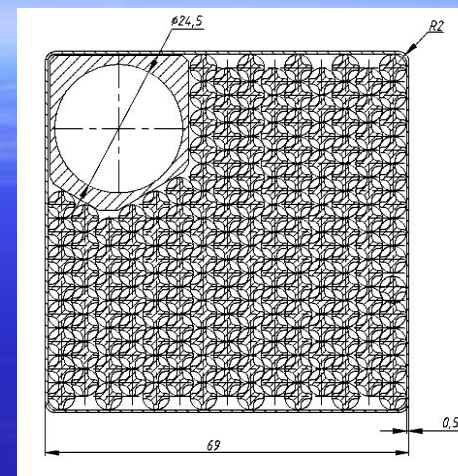
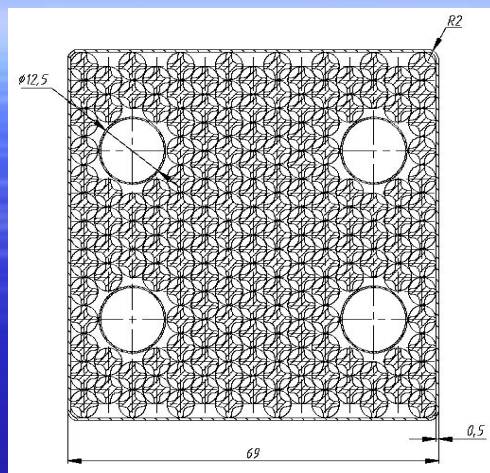
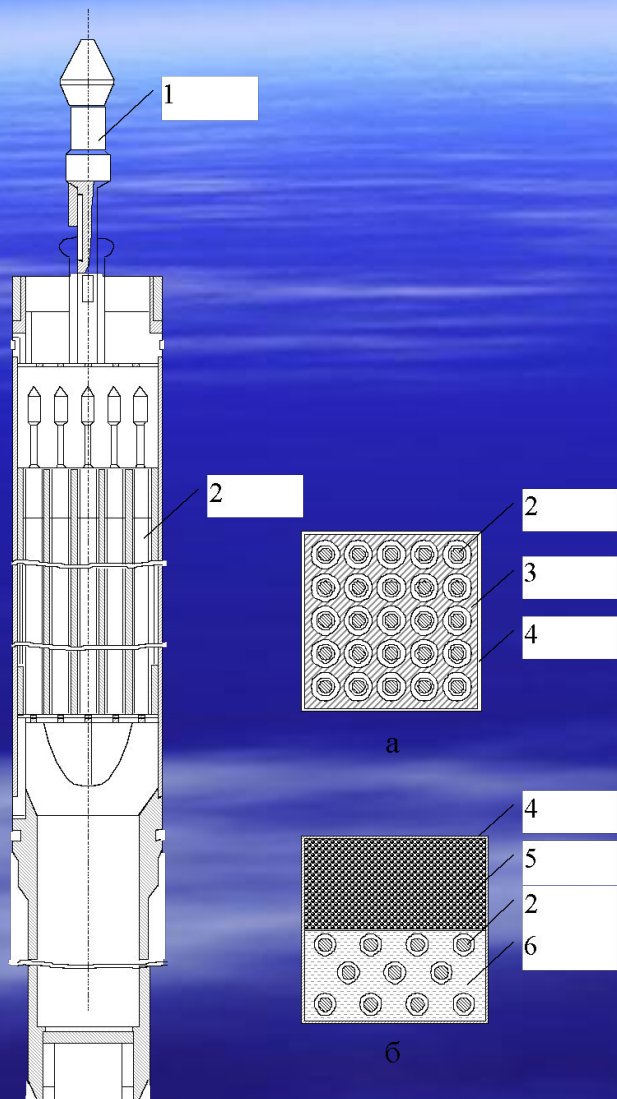
### Для реактора МИР:

- ЭТВС и сборки твэлов в петлевых каналах;
- Устройства для испытаний твэлов в переходных и аварийных режимах;
- ЭТВС в рабочих каналах;
- Устройства для накопления радионуклидах

### Для реакторов РБТ:

- Ампульные вертикальные каналы с облучаемыми материалами;
- Прямоточные экспериментальные каналы
- Устройства в объеме ТВС

# ЭУ в активной зоне реактора СМ



- 1
- 2
- 3
- 4

# Эффективность КО реактора СМ и эффекты реактивности при размещении ЭУ в объеме ТВС

Заполнение яч.52	Эффективность КО, $\beta_{эф}$				Подкритичность,	Эффект реак-ти
	КО-1	КО-2	КО-3	КО-4	$\beta_{эф}$	$\beta_{эф}$
ТВС типа 184.05.	1,2	1,4	1,2	1,2	2,0	0
Вода	0,8	1,4	1,2	1,1	2,8	-0,8
13 мишеней в воде	0,8	1,4	1,3	1,1	4,2	-2,2
25 мишеней в воде	0,7	1,2	1,3	1,1	4,6	-2,6
Бериллий	0,9	1,4	1,1	1,1	2,6	-0,6
13 мишеней в бериллии	0,8	1,3	1,2	1,1	2,8	-0,8
13 мишеней в бериллии, 12 ячеек заполнены водой	0,8	1,3	1,2	1,1	2,9	-0,9
25 мишеней в бериллии	0,7	1,3	1,2	1,1	3,1	-1,1
Две «полукассеты» с 11 мишенями в воде вплотную	1,0	1,2	1,3	1,0	3,5	-1,5
Две «полукассеты», с 11 мишенями в воде со смещением	1,3	1,3	1,3	1,2	2,9	-0,9

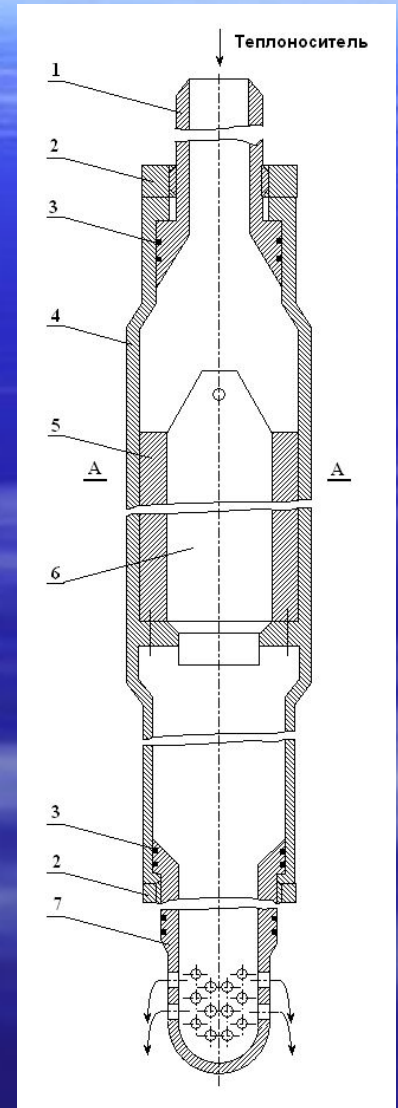
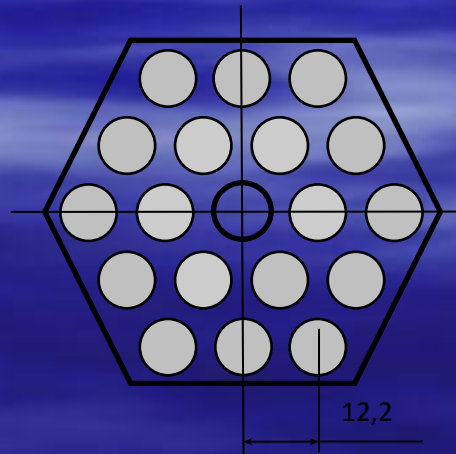
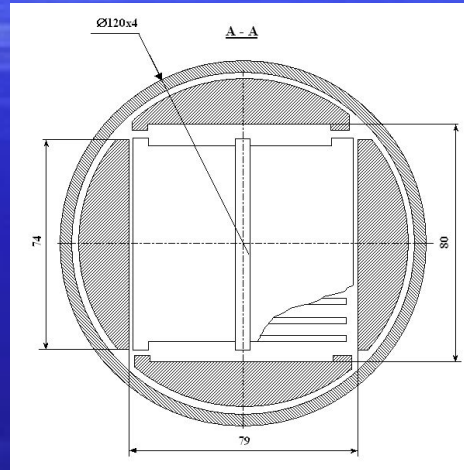
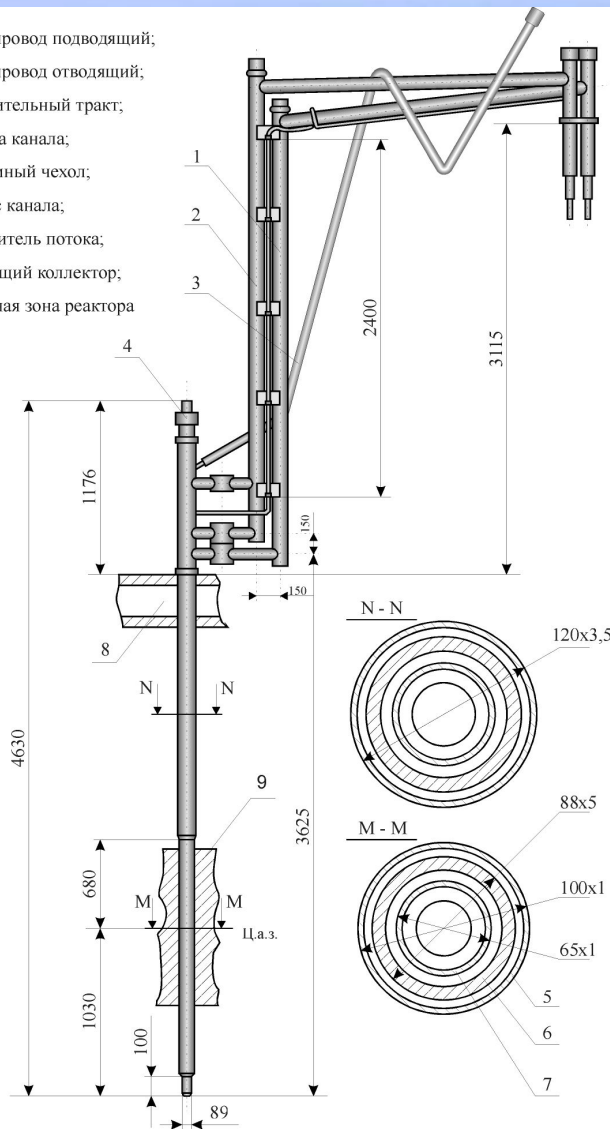


## Коэффициенты неравномерности энерговыделения для модернизированной активной зоны с ПК

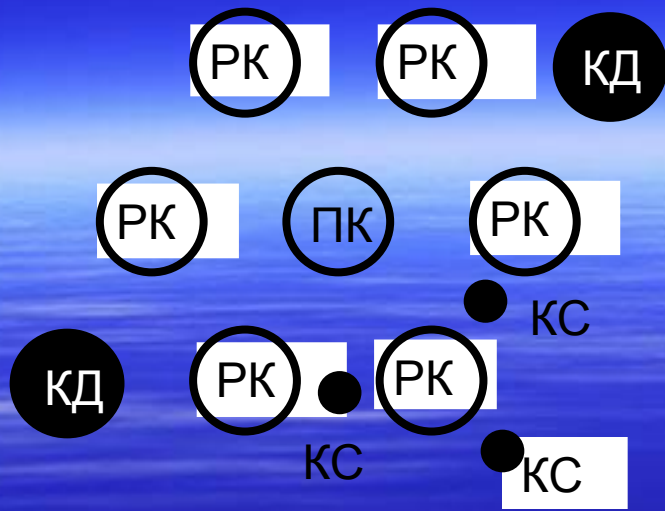
Модернизированная активная зона			Существующая активная зона		
ячейка	$k_s$	$K_k$	ячейка	$k_s$	$k_k$
72	1.52* (1.64**)	2.57	54	1.74**	2.27
53	1.63 (1.76)	2.62			
61	1.16 (1.25)	1.94	44	1.33	1.60
44	1.25 (1.35)	1.83			
51	0.88 (0.95)	1.89	45	0.92	1.94
81	0.94 (1.01)	2.34			
52	1.19 (1.28)	2.18	55	1.26	1.99

# ЭУ в активной зоне реактора МИР

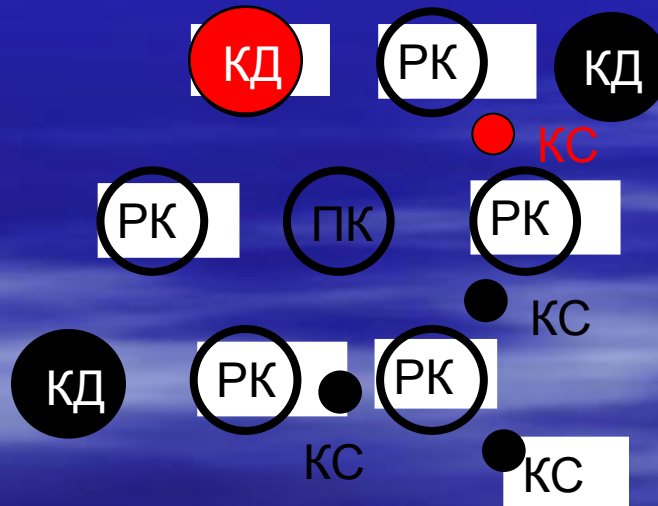
- 1 - Трубопровод подводящий;
- 2 - Трубопровод отводящий;
- 3 - Измерительный тракт;
- 4 - Головка канала;
- 5 - Вакуумный чехол;
- 6 - Корпус канала;
- 7 - Разделитель потока;
- 8 - Подающий коллектор;
- 9 - Активная зона реактора



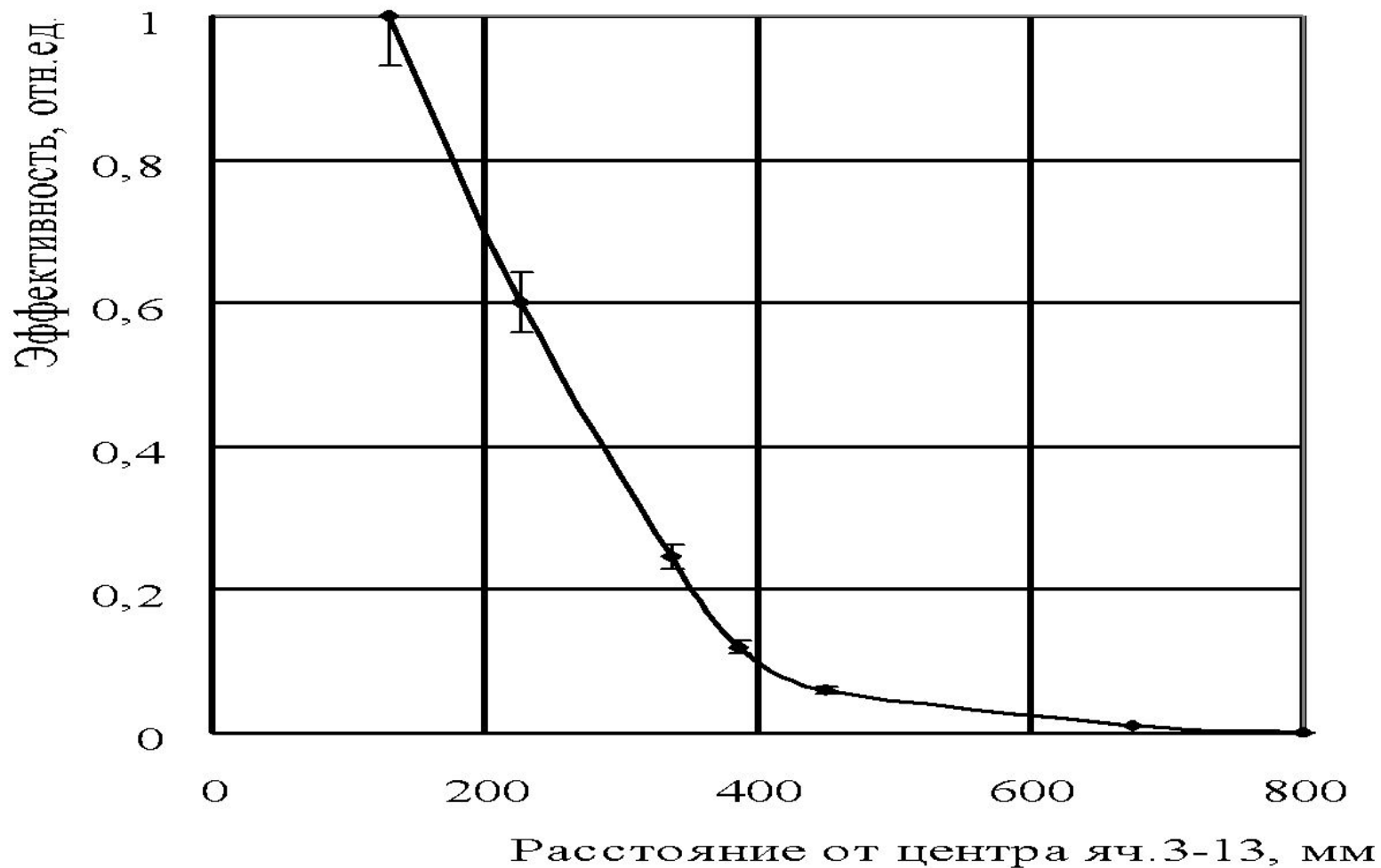
- 1
- 2
- 3



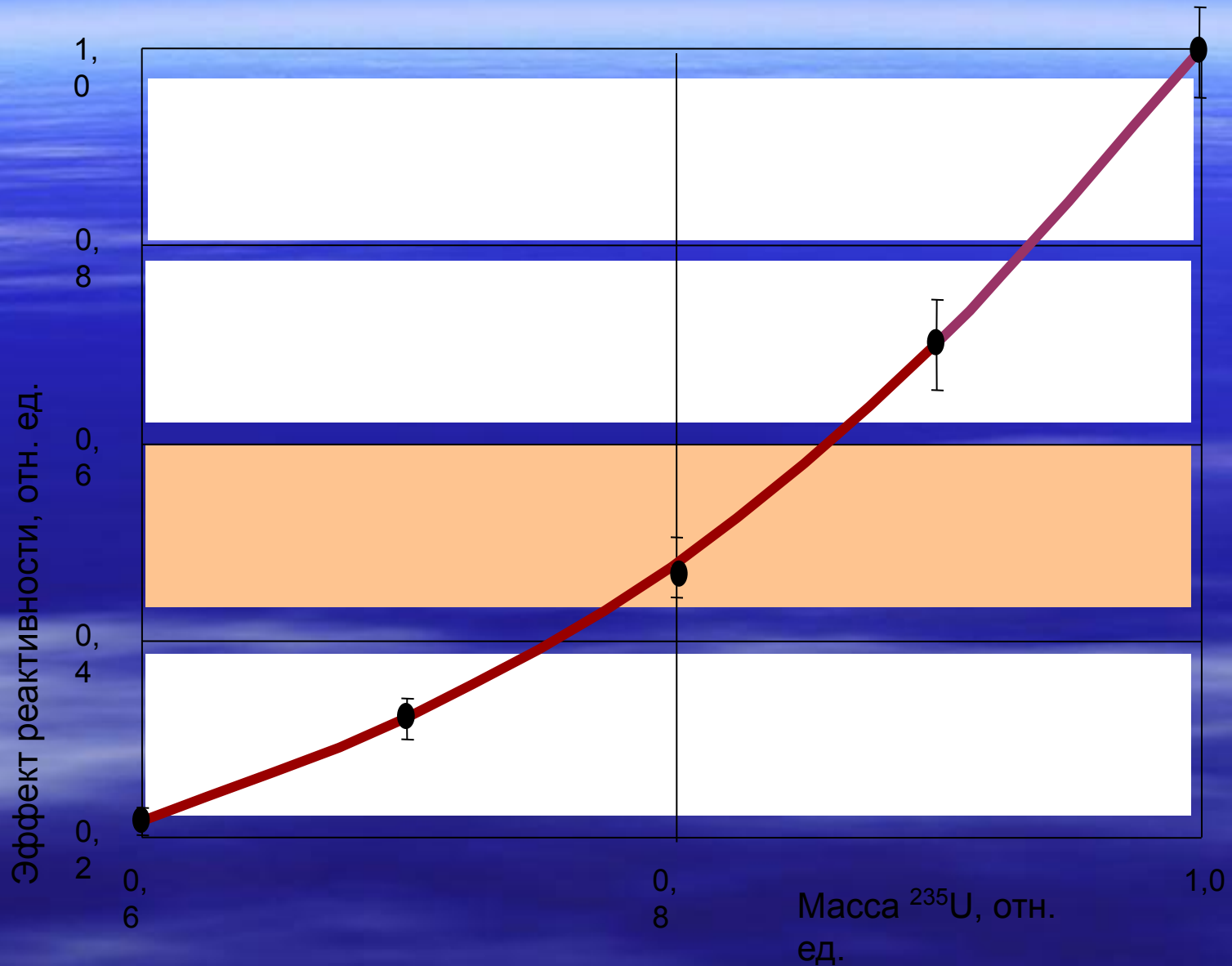
PK – рабочий канал;  
 ПК – петлевой канал;  
 КД – компенсатор с догрузкой;  
 КС – компенсирующий стержень.



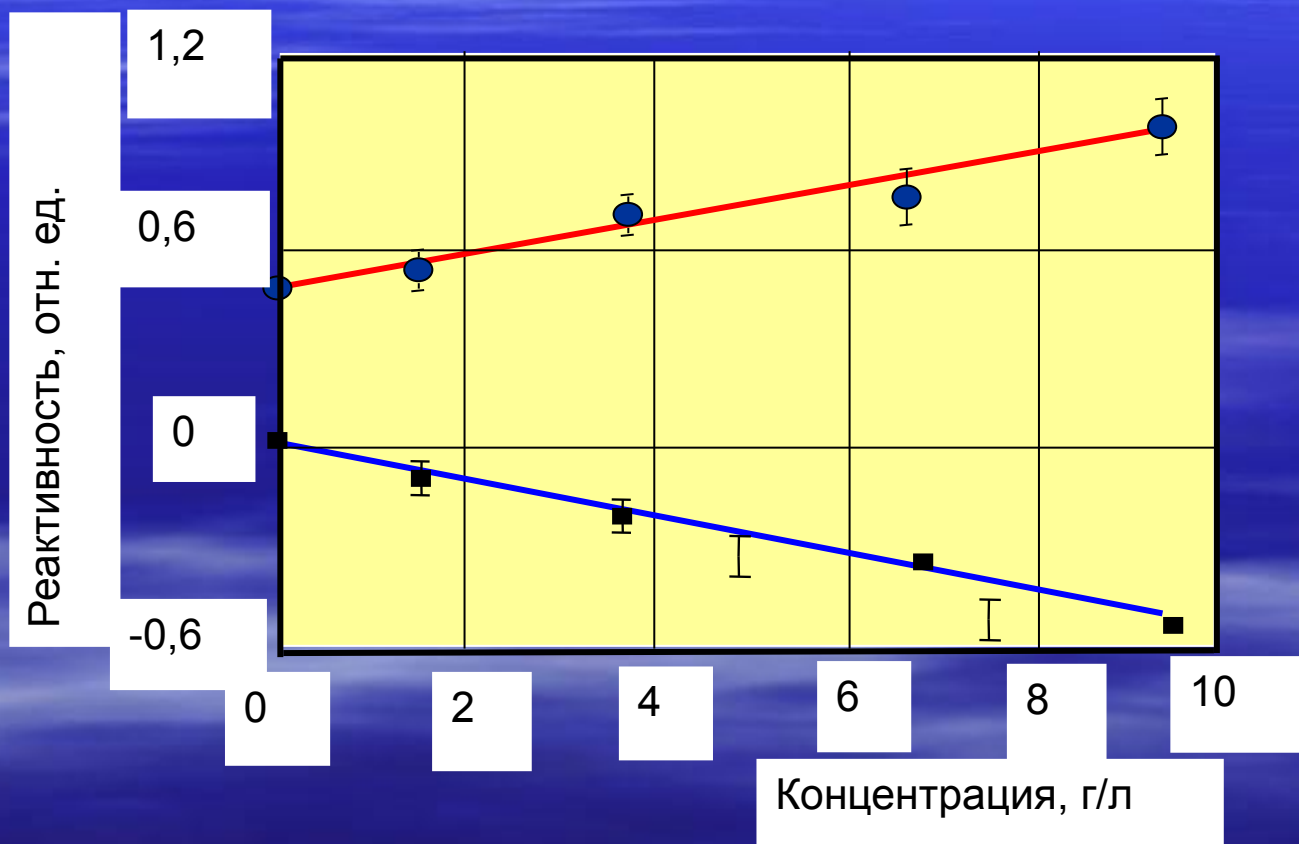
# Изменение эффективности стержней СУЗ в зависимости от расстояния до центра локальной области



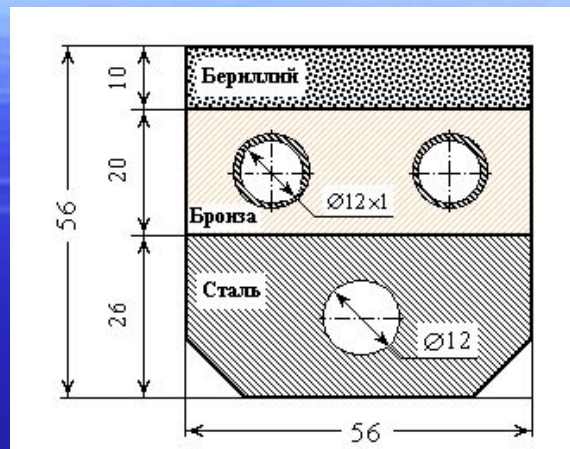
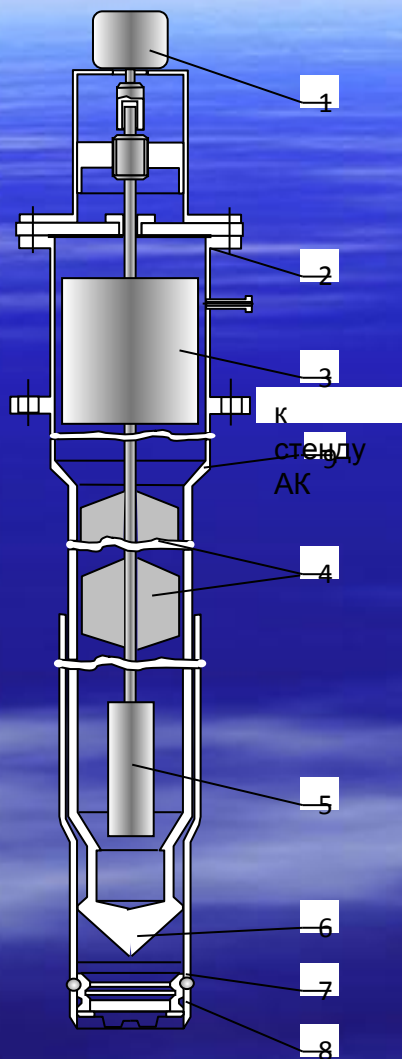
# Изучение эффекта реактивности при удалении воды из петлевого канала



# Добавка в теплоноситель раствора борной кислоты увеличивает значение эффекта реактивности и снижает запас реактивности реактора



# ЭУ в активной зоне реакторов РБТ

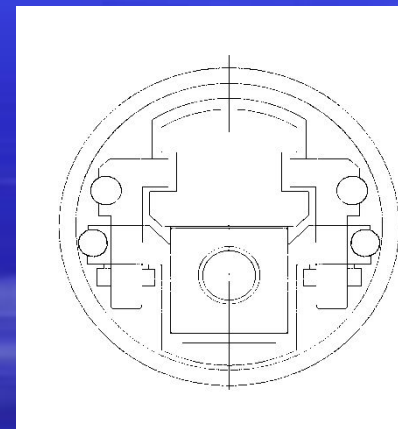
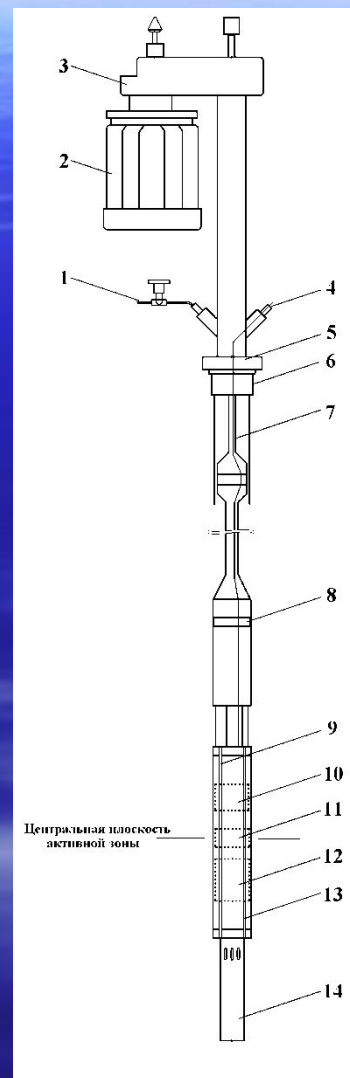
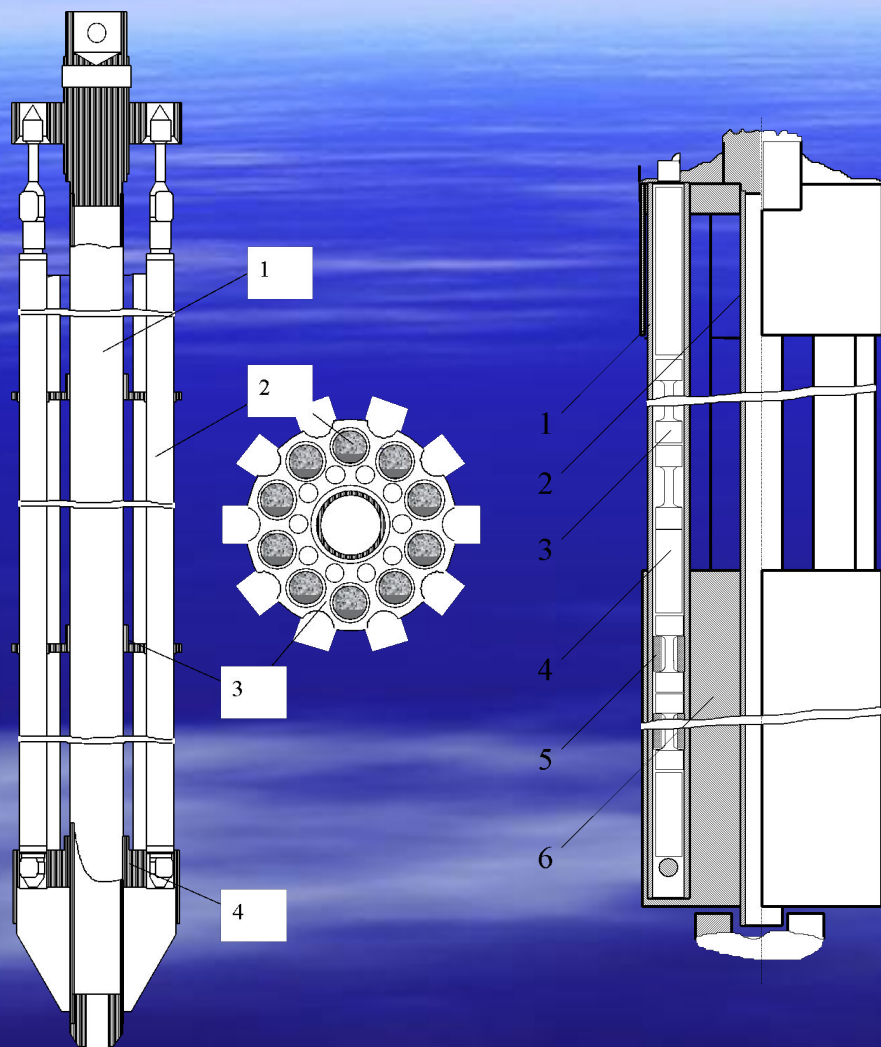


# Эффекты реактивности при перегрузочных операциях в реакторах РБТ

<b>Операция</b>	<b>Эффект реактивности, <math>\beta_{эф}</math></b>
Перемещение ампулы в канале № 2	$\pm (0,41 \pm 0,03)$
Перемещение ампулы в канале № 6	$\pm (0,18 \pm 0,01)$
Загрузка пустого канала в ячейку № 5	$- (0,09 \pm 0,01)$
Загрузка ОУ в канал № 5	$- (0,15 \pm 0,01)$
Выгрузка алюминиевой пробки	$- (0,36 \pm 0,03)$
Выгрузка алюминиевого вытеснителя	$- (0,22 \pm 0,02)$
Загрузка ОУ	$- (0,44 \pm 0,03)$
Загрузка устройства для накопления Мо-99	$+ (1,2 \pm 0,7)$



# ЭУ в отражателе реактора СМ



# Эффекты реактивности от загрузки ЭУ в ближние ячейки отражателя реактора СМ

Загружаемое устройство	Значение эффекта реактивности, $\beta_{эф}$	
	По подкритичности	По запасу реактивности
С 10-ю мишенями с кобальтом в яч. 5	- 0,1	- 0,5
С 10-ю мишенями с иридием в яч. типа 5	- 0,03	- 0,4
С образцами сталей в яч. 4 - в корпусе петлевого канала из циркония - в стальном корпусе петлевого канала	- 0,03 0	- 0,3 - 0,05
С 20-ю образцами В <sub>4</sub> С в яч. 5: - в корпусе петлевого канала из циркония - в стальном корпусе петлевого канала	- 0,05 - 0,01	- 0,5 - 0,1
С образцами материалов термоядерной установки	- 0,1	- 0,3
Корпус стального петлевого канала в яч. 4	- 0,04	- 0,4
Сборка из 8 твэлов СМ с загрузкой <sup>235</sup> U 6г/твэл в яч. 2	+ 0,1	+0,4
Бериллиевая пробка в яч. типа Д-4	+0,06	+0,4

## Основные этапы обеспечения безопасности ИР:

- **заблаговременное установление степени влияния ЭУ на НФХ ИР;**
- **сопоставление полученных результатов по изменению НФХ активной зоны под воздействием ЭУ с проектными (допустимыми) пределами;**
- **выбор организационно-технических мер (в рамках применяемых эксплуатационных процедур) обеспечения ЯБ при проведении эксперимента;**
- **определение, в достаточно редких случаях, необходимых действий по изменению систем (элементов) реактора и/или режимов его эксплуатации, когда внедряемое ЭУ нового типа приводит к изменению проектных характеристик реактора.**

**ЭУ ИР предлагается разделить на четыре класса.**

**1 Класс – ЭУ, приводящие к изменению проектных характеристик ИР**

**2 Класс – ЭУ, требующие выполнения специальных организационно-технических мероприятий для сохранения эффективности органов СУЗ и распределения энерговыделения в активной зоне в проектных пределах**

**3 Класс – ЭУ, оказывающие влияние на реактивность, эффективность органов СУЗ и распределение энерговыделения в пределах проектных значений**

**4 Класс - ЭУ, не оказывающие влияния на реактивность, эффективность органов СУЗ и неравномерность распределения энерговыделения**

# Требуемые процедуры при подготовке эксперимента с ЭУ различного класса

Процедура	1 класс	2 класс	3 класс
Определение коэффициентов неравномерности энерговыделения и пределов изменения эффективности органов СУЗ	+	+	-
Определение температурного и мощностного коэффициентов реактивности	+	-	-
Выбор алгоритма перегрузок ТВС	+	+	-
Определение эффектов реактивности и влияния на эффективность РО СУЗ	+	+	+
Определение допустимых режимов работы реактора	+	+	±
Уточняющий анализ постулируемых аварийных ситуаций	+	+	+
Изменения эксплуатационной документации и обучение персонала	+	±	-
Подготовка требуемых документов, получение разрешения на эксплуатацию	+	-	-

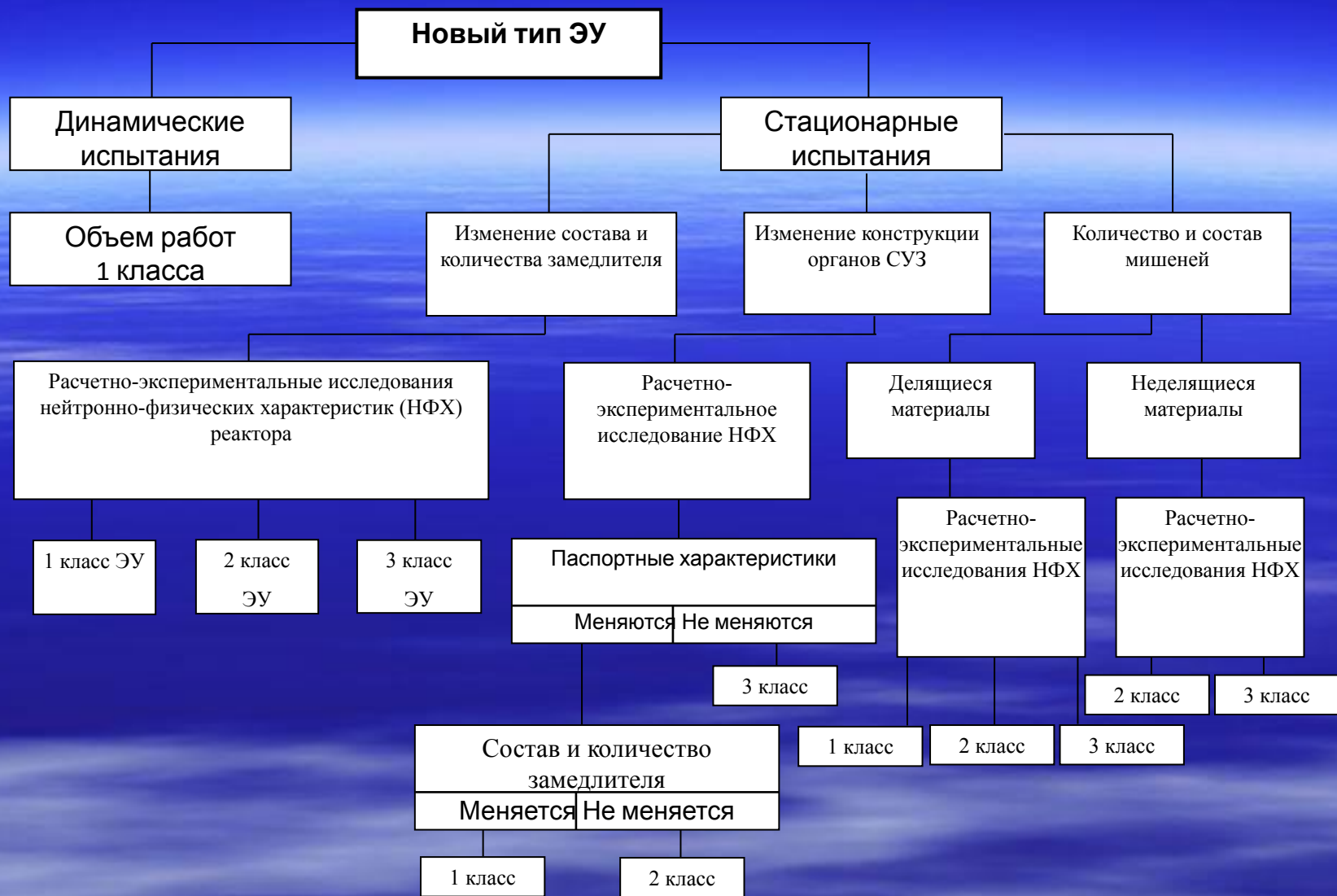


Схема установления класса ЭУ при планировании испытаний

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов проведенных расчетно-экспериментальных исследований характеристик ИР с различными типами ЭУ определены факторы и масштаб влияния экспериментальных устройств на нейтронно-физические и эксплуатационные характеристики, а также параметры, важные для безопасности.

Предложена классификация ЭУ по влиянию на характеристики реактора, важные для ядерной безопасности. Ее наличие позволяет установить этапы работы, необходимые и достаточные для обеспечения и обоснования ядерной безопасности реактора при проведении испытаний, оптимизировать и минимизировать объем подготовительных работ.

*Благодарю за внимание!*