



НИКИЭТ
РОСАТОМ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»



Особенности нейтронно-физических характеристик активной зоны с ТВС ПИК-2

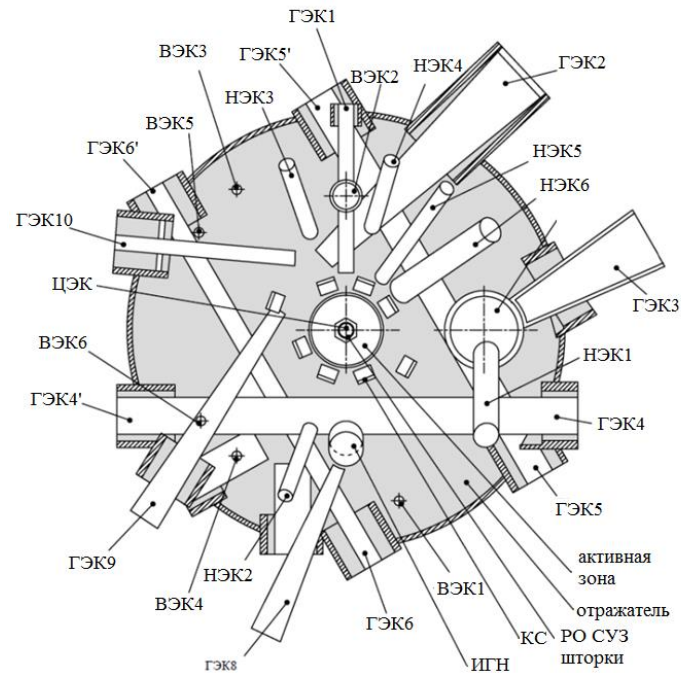
VI Международной научно-технической конференции «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики»

В.И. Мороко (АО «НИКИЭТ»),
А.А.Мясников (НИЦ «Курчатовский институт») ,
А.С. Захаров, С.Р. Фридман (НИЦ «Курчатовский институт»- ПИЯФ)

ПИК – высокопоточный исследовательский корпусной реактор водо-водяного типа, с теплоносителем под давлением.



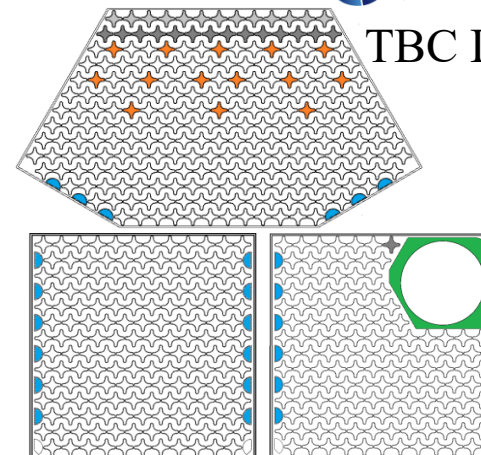
Характеристики ПИК		Значение
Номинальная мощность, МВт		100
Объем активной зоны, л		50
Топливо		UO ₂ (обогащением по ²³⁵ U 90%), диспергированный в медно-бериллиевую матрицу
Оболочка твэла		Сталь ЭИ-847
Тип твэла		Крестообразный
Отражатель		Тяжелая вода
ППТН в нейтронной ловушке (невозмущённая), см ⁻² ·с ⁻¹		4.2·10 ¹⁵
ППТН в отражателе (невозмущенная), см ⁻² ·с ⁻¹		1.2·10 ¹⁵
РО СУЗ	гафний	Две шторки
	оксид европия	6 стержней КС и 2 стержня АЗ



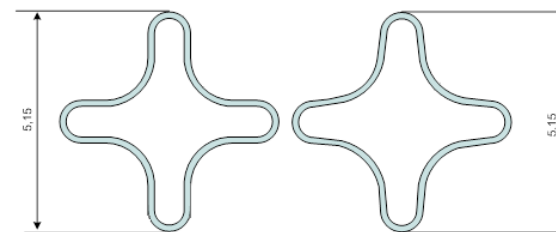
Сравнение ТВС ПИК-1 и ТВС ПИК-2



ТВС ПИК-2



Изменение профиля твэла



ПИК-1

ПИК-2

Характеристика	ТВС ПИК-1 Пусковая	ТВС ПИК-2
Типы ТВС	Шестигранная ТВС Квадратная ТВС	Шестигранная ТВС Квадратная ТВС Квадратная ТВС с ОС
Наличие СВП	Нет	Да
Площадь твэла, мм ²	10.08	10.46
Площадь топливного сердечника, мм ²	7.23	8.05
Шаг решетки, мм	5.23	
Профилирование загрузки урана		
Ряд 1	0.33	0.38
Ряд 2	0.33	0.69
Номинальная масса ²³⁵ U в твэле	-	+20%
Материал чехла ТВС	Сталь	Цирконий

Методика нейтронно-физического расчета



MCU-PTR – программа для ЭВМ, позволяющая проводить моделирование процессов переноса нейтронов, фотонов аналоговыми и неаналоговыми методами Монте-Карло на основе оценённых ядерных данных с учётом изменения изотопного состава материалов.

Аттестована: для бассейновых реакторов ИР-8, ИРТ-МИФИ, ИРТ-Т.

Для автоматизации и реализации непрерывного моделирования перегрузок активной зоны создана программная оболочка **PEREGRUZKA** со следующим функционалом:

- автоматическое моделирование перегрузок и перестановки ТВС,
- определение среднего и максимального выгорания ^{235}U по типам твэлов в ТВС и по ТВС,
- обработка результатов расчета распределения энерговыделения по ТВС.

Цели оптимизационной задачи при создании ТВС ПИК-2

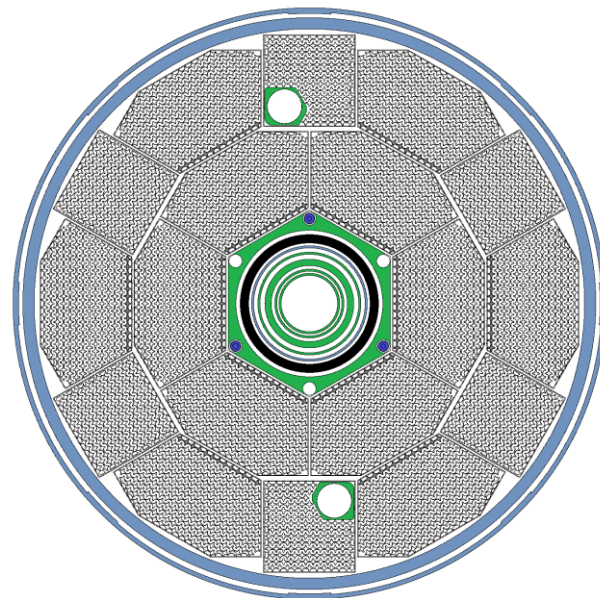
Рассматривается задача уменьшения неравномерности энерговыделения.

При этом необходимо обеспечить:

1. Длительность кампании 20-25 сут в режиме перегрузки $\frac{1}{2}$ активной зоны
2. Подкритичность не менее 1 % ($K_{эфф} \leq 0.99$) при взведенных АЗ согласно требованиям НП-009-17.

В процессе оптимизации варьировались:

1. Профилирование загрузки урана в твэле.
2. Место расположения и количество СВП.
3. Форма СВП (цилиндр или крестообразный).
4. Плотность загрузки гадолиния.
5. Схема перегрузки ТВС



Активная зона реактора ПИК для оптимизации исходная

Анализ распределения энерговыделения

Распределение энерговыделение определяют следующие отличительные факторы активной зоны и ее свойств:

- компактный размер активной зоны с наличием неоднородностей ЦЭК, образцы-свидетели, СВП.
- промежуточный спектр нейтронов.
- теплоноситель/замедлитель легкая вода.

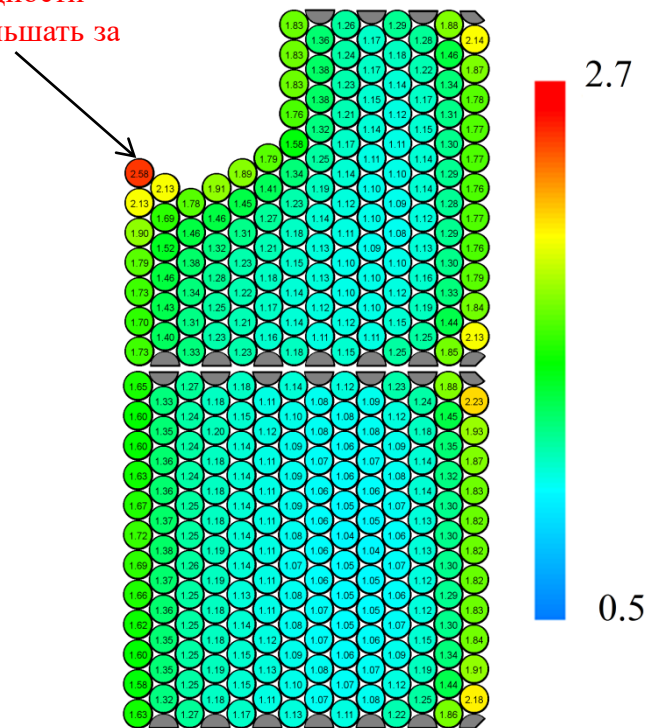
Локальный коэффициент неравномерности K_{vi} :

$$K_{vi} = \frac{q_i^{max}}{q_{ср}^{a.з.}}$$

q_i^{max} - Максимальное объемное энерговыделение в i твэле

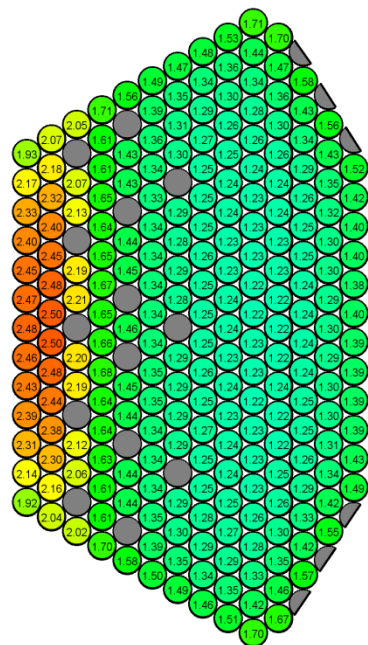
$q_{ср}^{a.з.}$ - Среднее объемное энерговыделение в активной зоне

Всплеск мощности
Если не уменьшать за

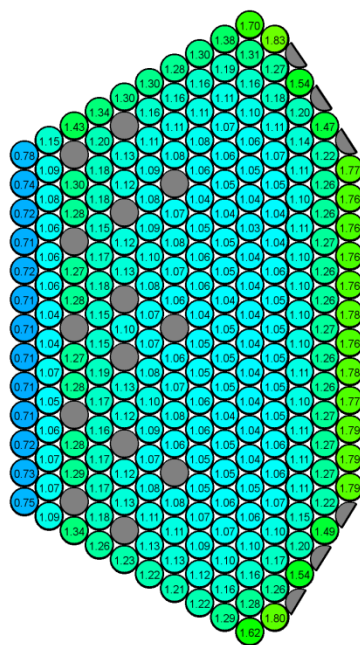


Распределение K_{vi} по квадратным ТВС

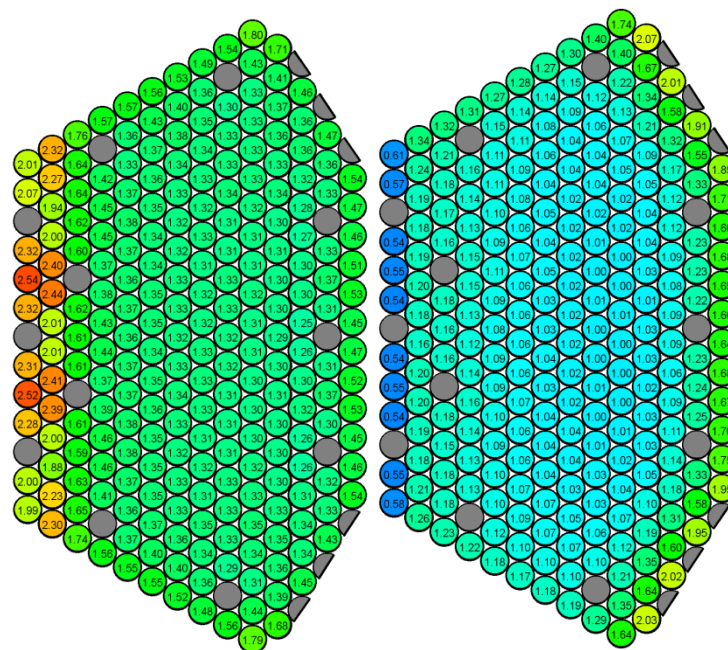
Анализ распределения энерговыделения



Ряд 1



Ряд 2

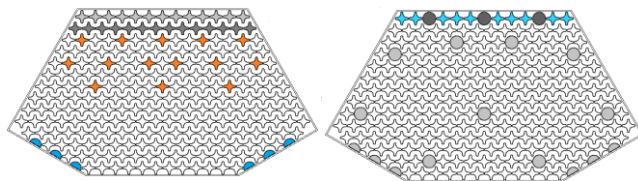


Ряд 1

Ряд 2

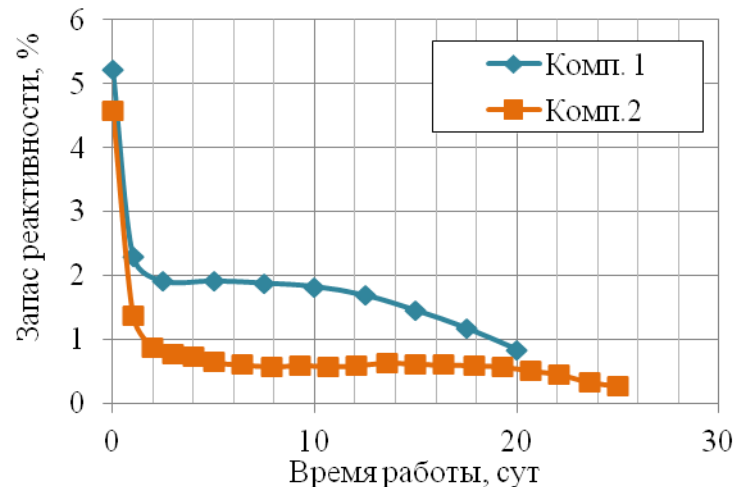
Распределение K_{vi} по шестигранным ТВС

Сравнение двух возможных вариантов ТВС ПИК-2



Параметр	Компоновка 1	Компоновка 2
Профилирование твэлов	Двухрядное (0.38/0.69)	Однорядное 0.48
Схема перегрузок	Из края в центр	Из центра в край
Количество СВП на месте твэлов в шестигранной ТВС	14	12
Запас реактивности при перегрузке ½ зоны, %	5.65	5.20
Подкритичность при введенных шторках на ПКВ и стержнях КС, %	1.76	1.42
Эффективность шторок, %	6.37	5.45
Эффективность стержней КС, %	1.58	1.64
Kv по активной зоне:		
начало кампании ($\Delta H=24$ см)	2.5	2.6
конец кампании ($\Delta H=61.2$ см)	2.3	2.7

Горячее состояние



Вывод: 1) компоновка 2 не обеспечивает достаточный запас на неопределенности расчета, запас реактивности мал для управления реактором 3) выбег реактивности практически отсутствует в 2-х вариантах частичных перегрузок

Баланс реактивности



НИКИЭТ
РОСАТОМ

Длительность кампании реактора, сутки		36.5	20
Максимальная реактивность без СВП, %		13.03	10.49
Средняя глубина выгорания ^{235}U выгружаемой части топлива, %		16	17.6
^{135}Xe , %		3.8	3.8
^{149}Sm , % *концентрация выше равновесной снижается		0.76	-0.12*
Температурные эффекты (топливо, замедлитель в а.з и ловушке), %		0.5	0.5
Выгорание топлива, % реактивности		7.5	4.2
Эффективность средств компенсации реактивности	Эффективность СВП, %	7.07	4.84
	Невыгорающая часть эффективности СВП, % реактивности	0.5	1.32
	Эффективность шторок, %	6.43	6.37
	Эффективность КС, шторки введены, %	1.96	1.96
	Эффективность АЗ – шторки и 2 стержня, %	1.64	1.61
	Эффективность всех РО СУЗ	9.01	8.97
Запас реактивности с СВП, %		5.96	5.65
Подкритичность, РО АЗ извлечены, %		1.42	1.76
Подкритичность, РО АЗ введены, %		3.05	3.32

Нейтронно-физические характеристики реактора



НИКИЭТ
РОСАТОМ

Характеристика	ТВС ПИК-1	ТВС ПИК-2
Максимальная реактивность (18 свежих ТВС, нулевая концентрация Gd в ТВС ПИК-2), %	10.2	13.0 ³⁾
Схема перегрузок	1/3 ¹⁾	½
Длительность кампании, эфф. сут	4 ²⁾	20-25
Максимальный запас реактивности в равновесном режиме работы	5.14	5.65 ³⁾
Подкритичность шторки на ПКВ, КС введены	1.49	1.76
Среднее выгорание ТВС, %	17-20	18-22
Коэффициент неравномерности энерговыделения K_v	2.5-2.7	2.5
Максимальный тепловой поток, усредненный по сечению твэла, МВт/м ²	7.6	7.65
Максимальная плотность потока нейтронов в центральной ловушке (невозмущенная), н/см ² ·с:		
– тепловых с $E < 0.625$ эВ;	$4.2 \cdot 10^{15}$	$4.2 \cdot 10^{15}$
– быстрых с $E > 0.1$ МэВ	$1.1 \cdot 10^{15}$	$1.1 \cdot 10^{15}$
Максимальная плотность потока тепловых нейтронов ($E < 0.625$ эВ) в отражателе (невозмущенная), н/см ² ·с:	$1.3 \cdot 10^{15}$	$1.3 \cdot 10^{15}$
¹⁾ Фактически работа с уменьшенной загрузкой ТВС до 16 ТВС из-за отсутствия возможности установки образцов-свидетелей в ТВС ²⁾ При кратковременном выходе на полную загрузку с 18 ТВС ³⁾ Подлежит уточнению по результатам первого этапа приемосдаточных испытаний		

Моделирование набора активной зоны

Кол-во ТВС	$K_{эф}$			
	ЖР - воздух		ЖР - D ₂ O	
	18 выт.	6 кв. выт.	18 выт.	6 кв. выт.
12	0.9736		0.9763	
13	0.9924		0.9951	
14	1.0078		1.0107	
15	1.0241		1.0269	
16	1.0375		1.0404	
17*	1.0500		1.0529	
18*	1.0606		1.0633	

* Загружаются ТВС с ОС

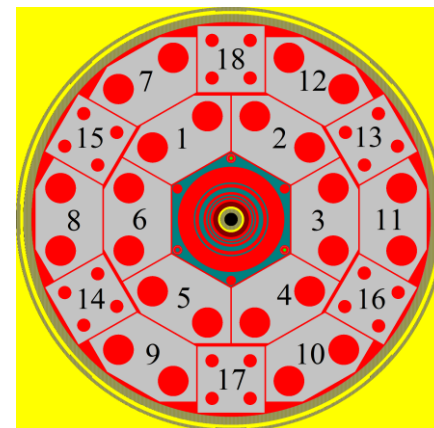
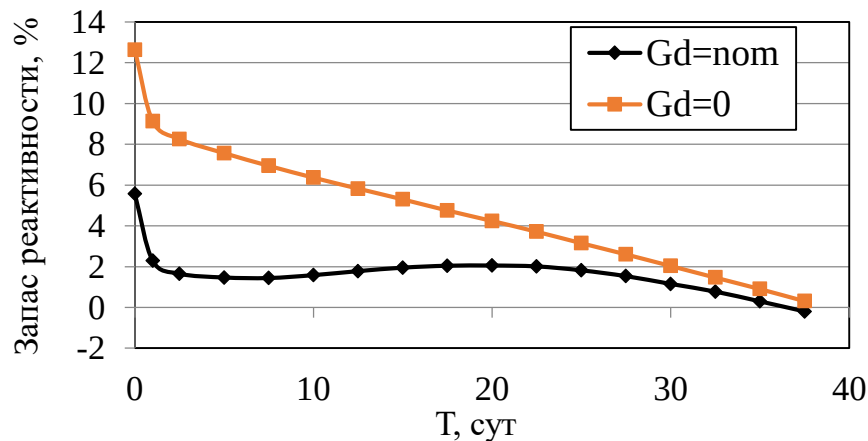
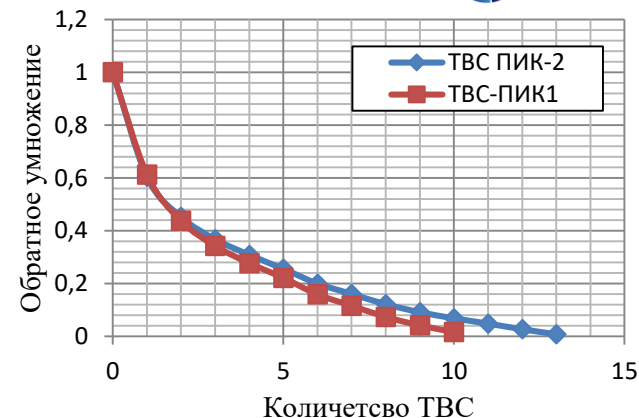
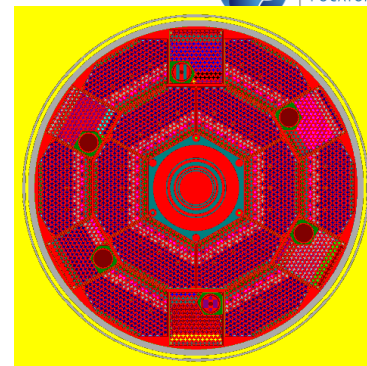
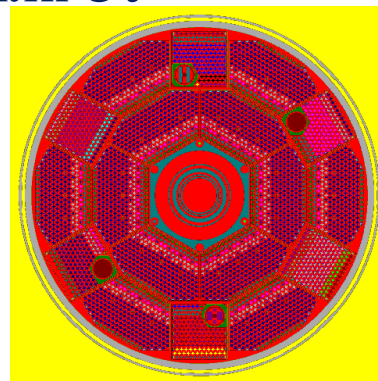
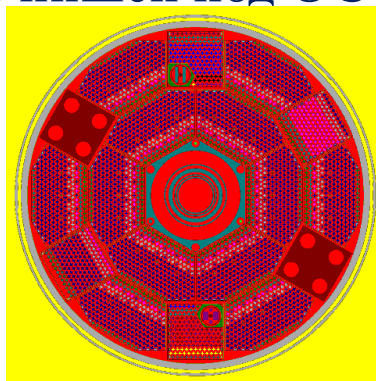


Схема загрузки ТВС

Альтернативные компоновки активных зон с дополнительными квадратными ТВС с нишей под ОС или ЭУ

Установка дополнительных квадратных ТВС с нишей позволяет компенсировать реактивность и предоставляет дополнительные экспериментальные объемы



Характеристика	12 шест. + 2 кв. + 2 кв. с ОС	12 шест. + 6 кв. с ОС	12 шест. + 2 кв. + 4 кв. с ОС
Запас реактивности (свежие ТВС), %	3.49	5.24	5.61
Подкритичность, шторы на ПКВ, КС введены, %	4.69	2.40	1.90
Эффективность шторок, КС и стержни АЗ извлечены, %	6.30	6.61	6.55
Эффективность КС, шторы в положении ПКВ, %	2.06	1.95	1.90
Эффективность КС и АЗ, шторы сведены, %	2.50	2.60	2.54
ППТН/ППБН на уровне ц.п.а.з. в нише (90 МВт), $10^{15} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$	-	0.2/1.7	0.2/1.7
K_v (окно шторок 24 см)	2.62	2.66	2.67

В докладе приведены результаты исследования нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора с ТВС ПИК-2. Представлены:

- основные принципы формирования конструкции ТВС ПИК-2.
- характерное распределение энерговыделения;
- плотность потока нейтронов;
- баланс реактивности;
- схема набора активной зоны с ТВС ПИК-2;
- стартовые компоновки активной зоны ТВС ПИК-2;
- в разработанной расчетной модели используется детальное описание конструкции активной зоны и отражателя с возможностью потвэльного исследования энерговыделения и концентрации поглощающих материалов в процессе выгорания. По результатам испытаний головного комплекта ТВС ПИК-2 в модель может быть уточнена.

Спасибо за внимание !

Мороко Василий Игоревич

Ведущий инженер отдела № 215 физических исследований новых
реакторных технологий

E-mail: vmoroko@nikiet.ru