



Федеральное государственное бюджетное учреждение  
«Национальный исследовательский центр»  
«Курчатовский институт»

# Моделирование нейтронной кинетики в активной зоне реактора SPERT III в программе КИР

**Белоусов В.И., Дьячков И.И., Иоаннисиан М.В., Писарев А.Н.**



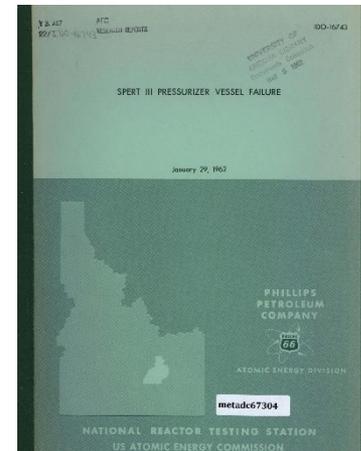
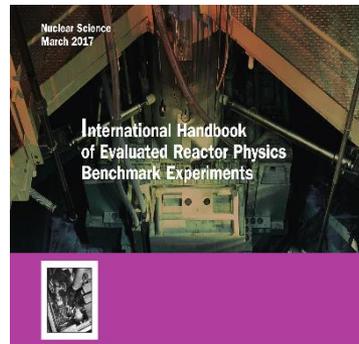
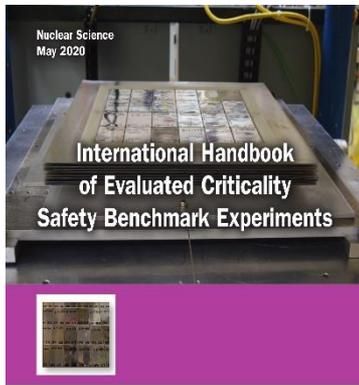
# Введение

- Решение нестационарного уравнения переноса нейтронов в реакторе (нейтронной кинетики) представляет сегодня одну из наиболее сложных задач реакторной физики.
- Современные вычислительные средства позволяют проводить нейтронно-физические расчёты с использованием методов Монте-Карло, как с приближениями (адиабатическое, многозонное, квазистатическое), так и прямым моделированием с отслеживанием расширенного фазового пространства частиц с временной зависимостью без приближений.
- Прямой метод Монте-Карло позволяет обойти ограничения, характерные для детерминистических методов, связанные с дискретизацией по пространству, энергии и углам.
- Программа КИР предназначена для расчёта стационарных и нестационарных нейтронно-физических процессов в ЯЭУ на основе метода Монте-Карло.



# База бенчмарков

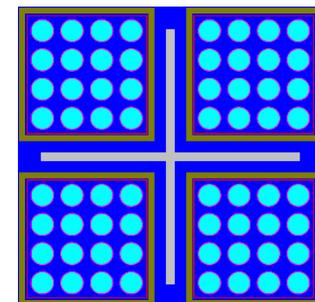
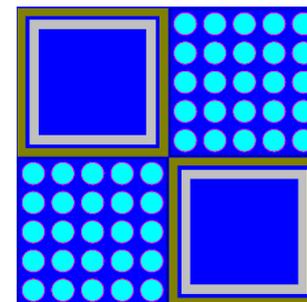
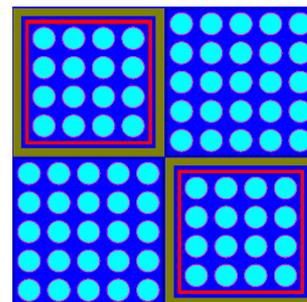
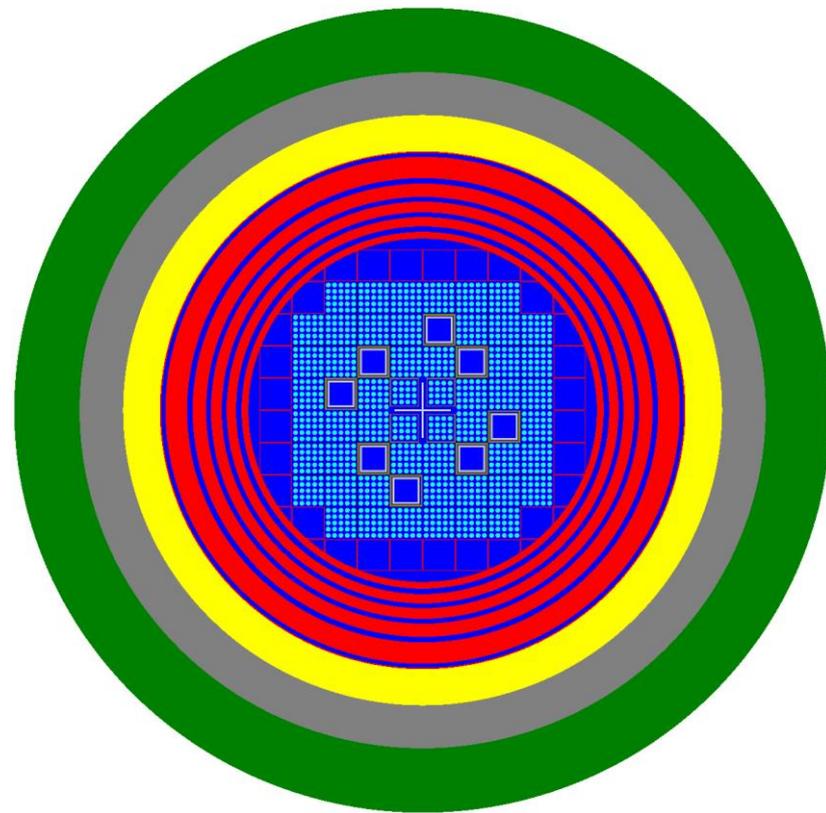
- Для стационарных процессов существуют сборники критических (ICSBEP) и реакторных (IRPhEP) экспериментов.
- Имеются отчёты и несколько опубликованных бенчмарков для исследовательской реакторной установки SPERT III.





# Описание модели

Параметр, единица измерения	Значение
Количество ТВС в активной зоне, шт.	60
Мощность реактора тепловая (номинальная) мощность, МВт	40
Рабочее давление и температура, МПа/К	17.237/616
Расход теплоносителя через активную зону реактора, м <sup>3</sup> /ч	4.542
Число ТВС, содержащих органы регулирования, шт.	8
Материал топливной таблетки твэла	UO <sub>2</sub>
Теплоноситель, замедлитель, отражатель	H <sub>2</sub> O
Обогащение топлива по изотопу <sup>235</sup> U, массовый %	4.80





# Задачи исследования

## Этапы работы

1. Разработка подробной модели реактора SPERT III с детальным описанием геометрии и состава. Проверка корректности физических параметров для стационарной конфигурации реактора ( $H_{кр}$ ,  $k_{эфф}$ ,  $\beta_{эфф}$ ,  $\Lambda_{эфф}$  и другие).
2. Расчёт периодов реактора при введении заданной положительной реактивности (от 0.5\$ до 1.3\$) для всей серии экспериментов (~70), проведённых на реакторной установке SPERT III.
3. Моделирование нестационарных процессов с учётом обратных связей.



# Материалы и методы

## Стационарные конфигурации реактора

- Начальная загрузка активной зоны:  $T=294\text{K}$ , СУЗ в верхнем предельном положении.
- Холодное состояние с нулевой мощностью:  $T=294\text{K}$ , 0.10132 МПа (атмосферное давление).
- Горячее состояние с нулевой мощностью:  $T=561\text{K}$ , 12МПа.

## Конфигурации реактора для нестационарных процессов

Режим эксперимента	Температура теплоносителя, К	Давление, МПа	Начальная мощность реактора, МВт
Холодное состояние	294	атмосферное	$5 \cdot 10^{-5}$
Горячее состояние	400	10.342	$5 \cdot 10^{-5}$
	533	10.342	$5 \cdot 10^{-5}$
Горячий резерв	533	10.342	1
Рабочая мощность	533	10.342	20

- Алгоритм расчёта  $\beta_{\text{эфф}}$ ,  $\Lambda_{\text{эфф}}$  – БСП (блоки с перекрытием) – алгоритм с множественным перекрытием блоков.
- Статистика КИР – 2 млрд. историй нейтронов (для стационарной конфигурации).
- Библиотеки оценённых ядерных данных ENDF/B-VII.1 и РОСФОНД-2010.



# Стационарная конфигурация реактора

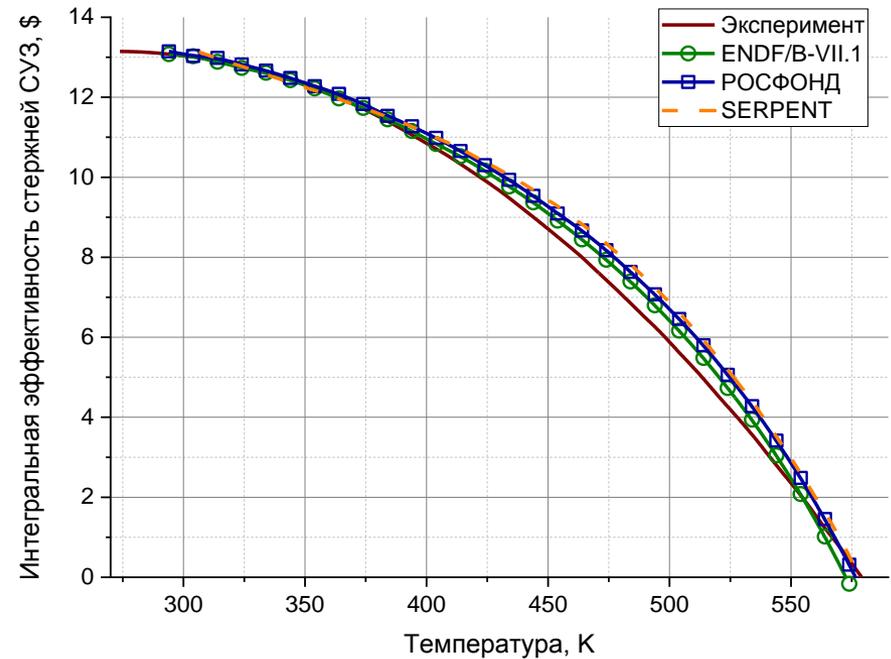
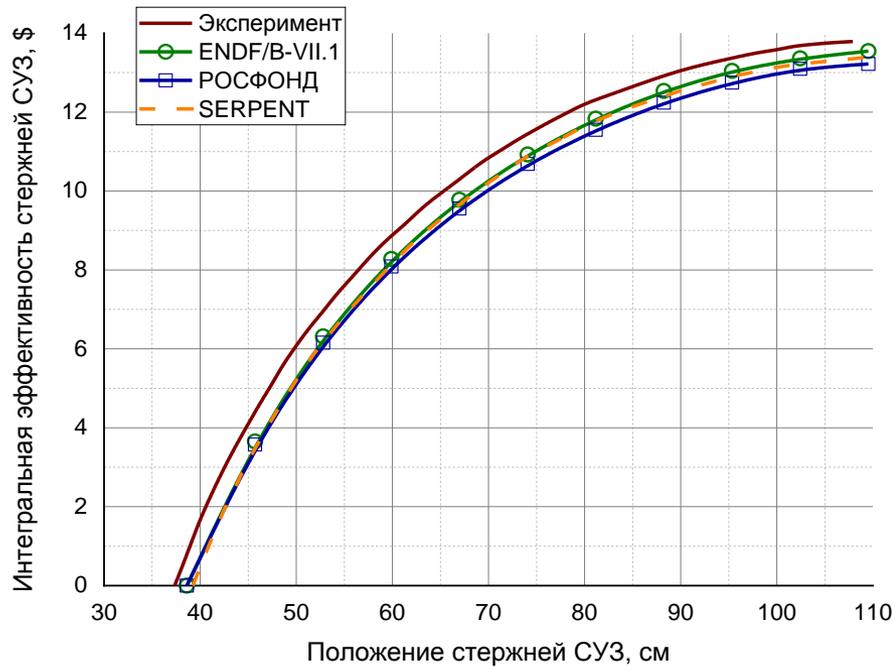
Параметр	Эксперимент		КИР				TRIPOLI		SERPENT
			ENDF/B-VII.1		РОСФОНД		JEFF3.1.1		ENDF/B-VII.0
	294K	561K	294K	561K	294K	561K	294K	561K	294K
$H_{кр}$ , см	37.084	71.755	38.62	72.63	38.62	72.63	36.96	71.76	39.23
$k_{эфф}$	1.0	1.0	1.00025(2)	1.00011(2)	0.99977(2)	0.99985(2)	1.00139(11)	1.00151(11)	-
$\beta_{эфф}$ , рсм	-	-	<b>742(1)</b>	<b>745(1)</b>	<b>762(1)</b>	<b>763(1)</b>	<b>761±4.6</b>	<b>765±4.4</b>	<b>748.8±3.0</b>
$\Lambda_{эфф}$ , мкс	-	-	17.68(1)	17.55(1)	17.63(1)	17.52(1)	17.3(2)	17.40(2)	-
ИЭ* СУЗ, \$	<b>13.1(7)</b>	<b>2.5</b>	<b>13.54(4)</b>	<b>2.44(2)</b>	<b>13.20(4)</b>	<b>2.38(2)</b>	<b>13.60(5)</b>	3.10(4)	<b>13.4</b>
ДЭ** СУЗ, \$/см	0.61	0.16	0.60	0.19	0.59	0.17	0.609(21)	0.19(1)	-
ИЭ центрального ПС, \$	<b>4.6</b>	<b>4.7</b>	<b>4.55(2)</b>	<b>4.62(2)</b>	<b>4.49(2)</b>	<b>4.59(2)</b>	4.42(3)	5.11(2)	4.4
ДЭ центрального ПС, \$/см	0.12	0.13	0.11	0.12	0.10	0.11	0.13(2)	-	-

\* интегральная эффективность

\*\* дифференциальная эффективность

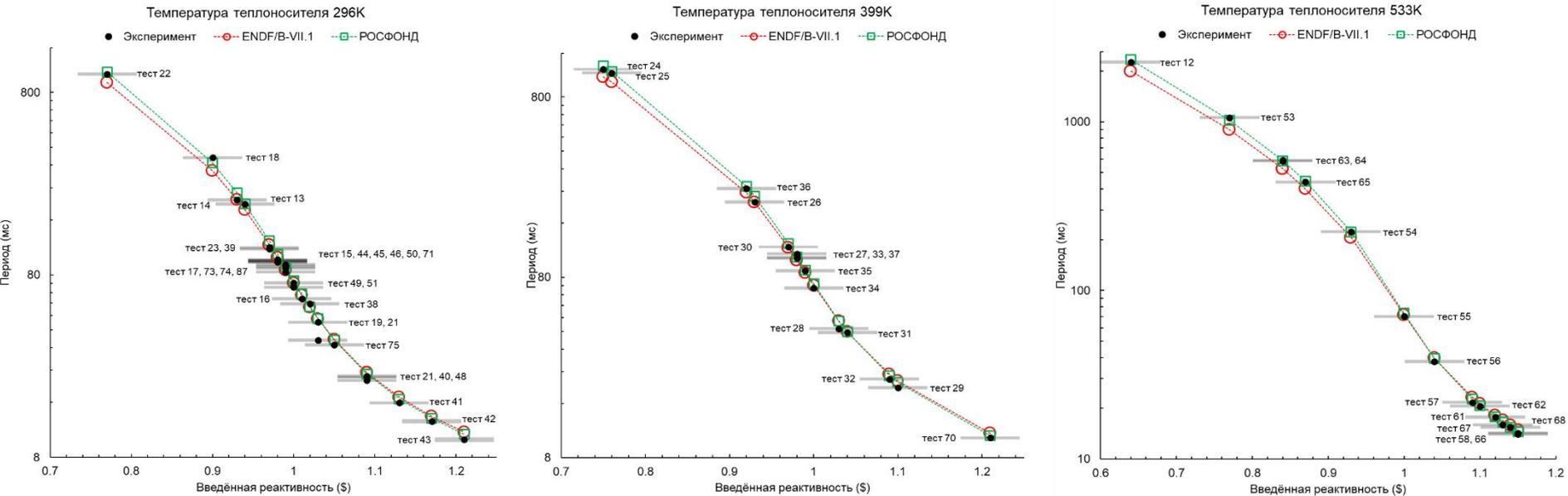


# Стационарная конфигурация реактора





# Валидация по нестационарным процессам



Результаты расчёта зависимости периода от введённой реактивности и его сравнение с экспериментальными значениями (на основе уравнения обратных часов)



# Валидация по нестационарным процессам

Процедура определения начального и конечного положения СУЗ и центрального ПС в экспериментах с введением положительной реактивности.

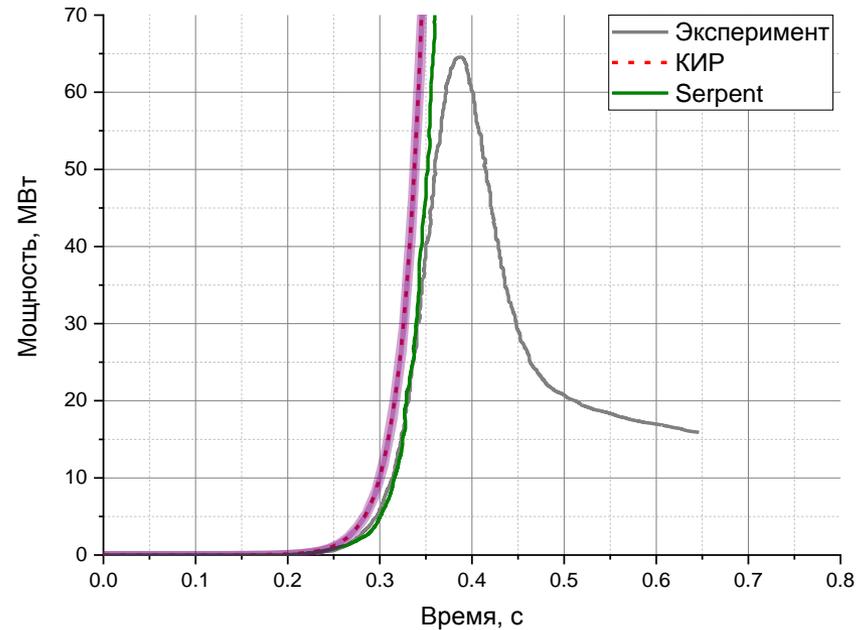
- 1) Поиск положения СУЗ, при котором реактор будет критичен. Поглощающая секция центрального стержня расположена ниже активной зоны реактора.
- 2) Поиск положения СУЗ, при котором вносится избыточная реактивность равная экспериментальной. Поглощающая секция центрального стержня расположена ниже активной зоны реактора.
- 3) Поиск положения центрального ПС, при котором реактор вновь будет критичен. Осевое положение СУЗ сохраняется таким же, как и на этапе (2).



5080 см/с<sup>2</sup>



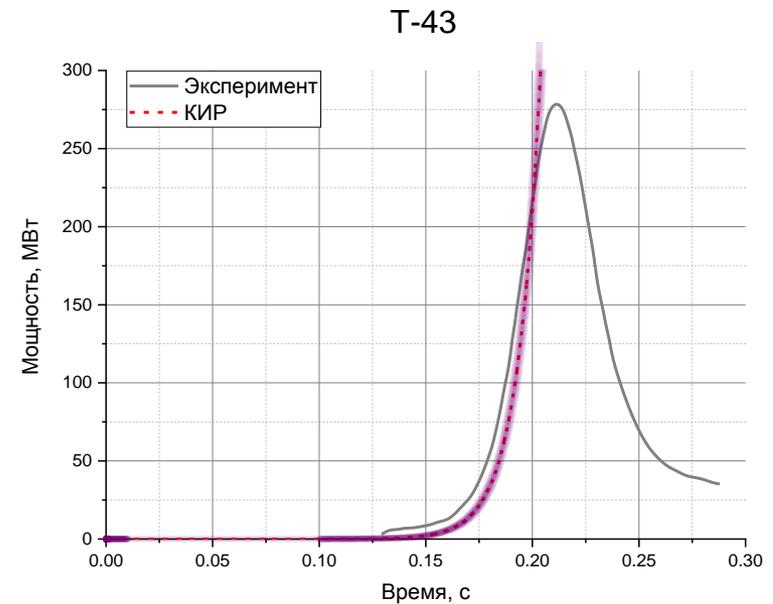
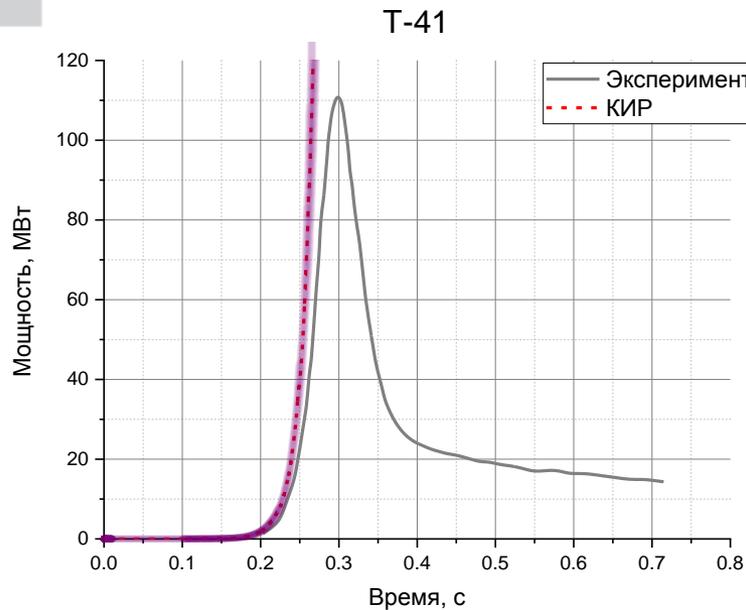
# Результаты расчёта нейтронной кинетики для эксперимента Т-32



		Период		
Введённая реактивность	Эксперимент	КИР		Serpent
		Адиабатический	Прямой	
1.09±0.04	21.8±0.4	22.8	22.7	27.1



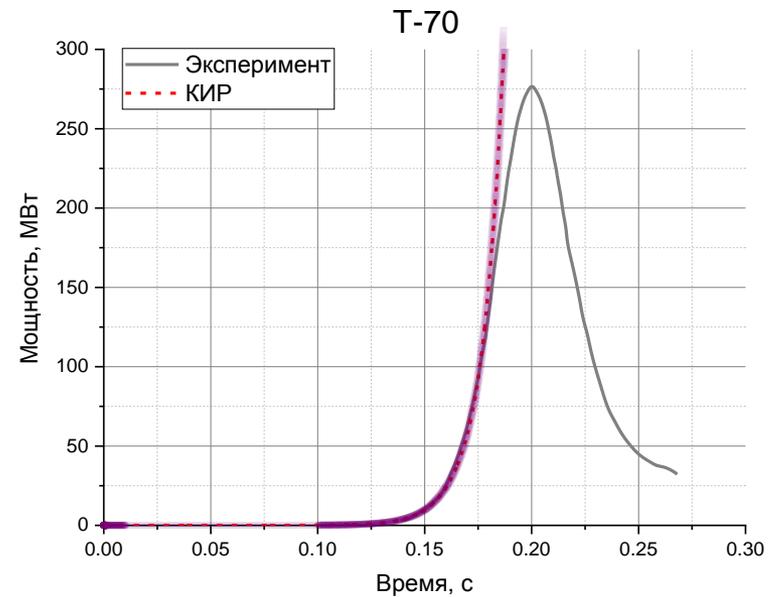
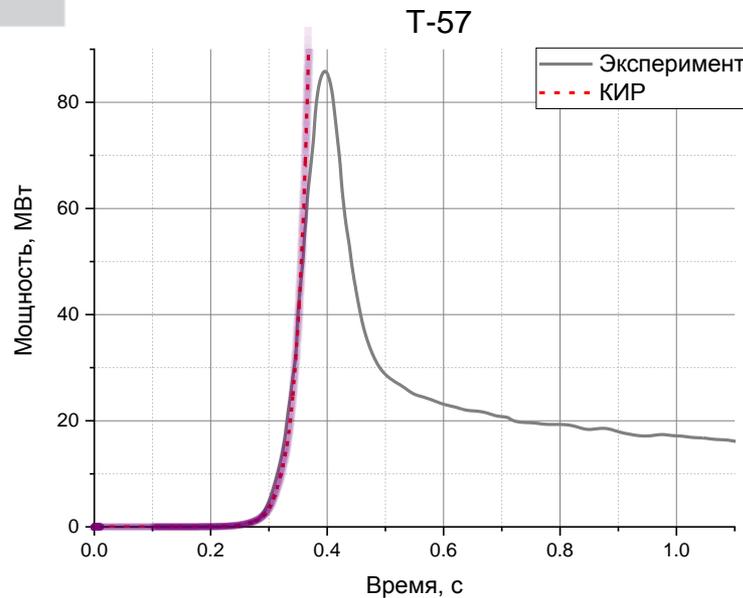
# Результаты расчёта нейтронной кинетики для экспериментов Т-41, Т-43



		Период		
Номер эксперимента	Введённая реактивность	Эксперимент	КИР	
			Адиабатический	Прямой
41	$1.13 \pm 0.05$	$15.9 \pm 0.3$	16.7	16.4
43	$1.21 \pm 0.05$	$10.0 \pm 0.3$	10.7	10.9



## Результаты расчёта нейтронной кинетики для экспериментов Т-57, Т-70



		Период		
Номер эксперимента	Введённая реактивность	Эксперимент	КИР	
			Адиабатический	Прямой
57	$1.09 \pm 0.04$	$21.7 \pm 0.4$	22.7	21.0
70	$1.21 \pm 0.05$	$10.3 \pm 0.2$	10.6	10.8



# Заключение

- ✓ Проведена проверка корректности физических параметров для стационарной конфигурации реактора. Результаты валидации подтверждают адекватность разработанной модели активной зоны реактора SPERT III и хорошее совпадение с экспериментальными данными.
- ✓ Проведена кросс-верификация программ KIP, SERPENT и TRIPOLI. Результаты расчётов по программе KIP демонстрируют хорошее согласие с результатами расчётов по другим программам.
- ✓ Проведены демонстрационные расчёты нейтронной кинетики для разгонных экспериментов без учёта обратных связей. Результаты программы KIP показывают корректную работу написанных алгоритмов (для адиабатического приближения и прямого метода) при расчёте изменения интегрального потока нейтронов во времени.
- ❑ Дальнейшие исследования будут направлены на моделирование нейтронной кинетики в активной зоне реактора SPERT III с учётом обратных связей, а также валидацию алгоритма расчёта нейтронной кинетики в многозонном приближении.



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

# Спасибо за внимание!

