

О постановке прецизионных ядерно-физических экспериментов для верификации кодов, используемых в расчетах жидкосолевого реактора-сжигателя минорных актиноидов

*Андреев С.А., Белоногов М.Н., Волков И.А., Литвин В.И., Модестов Д.Г.,
Симоненко В.А., Соколов Ю.А., Трапезников М.А., Хмельницкий Д.В., Юдов А.А.*

Цель работы

- ❑ В настоящее время ведутся исследования, направленные на создание жидкосолевого реактора (ЖСР-С), предназначенного для трансмутации минорных актиноидов (МА), которые накапливаются в отработавшем ядерном топливе (ОЯТ) тепловых реакторов.
- ❑ В соответствии с нормативными документами при разработке и проектировании объектов использования атомной энергии требуется применение аттестованных кодов, в том числе, предназначенных для нейтронно-физических расчетов.
- ❑ Для аттестации соответствующих кодов необходимы прецизионные эксперименты, проводимые в условиях, моделирующих характеристики ЖСР-С. В настоящее время такие эксперименты отсутствуют.
- ❑ Цель работы - обоснование постановки прецизионных экспериментов на критическом стенде ФКБН-2 [1] с размножающими системами (РС), моделирующими по составу материалов жидкосолевой реактор, результаты которых могут быть использованы для верификации нейтронно-физических кодов.



1. В.Г. Кравченко, В.И. Литвин, А.В. Лукин и др. Критмассовые benchmark эксперименты и измерения чисел реакций с цилиндрическими системами из урана, плутония и полиэтилена на стенде ФКБН-М. Препринт РФЯЦ-ВНИИТФ № 159, 1999.

Модель ЖСР-С

- ❑ Для определения спектральных характеристик ЖСР-С рассматривалась размножающая система конечных размеров с различным объёмом активной зоны.
- ❑ Геометрическая модель представляет собой цилиндрический стальной корпус (толщина 5.5 см, диаметр равен высоте), в который заливается соль активной зоны.
- ❑ Были выбраны 5 вариантов модели с различными объёмами активной зоны и мольными долями актиноидов

Вариант	Объём активной зоны, м3	Мольная доля актиноидов, %
1	0,5	25
2	1	20
3	2	17
4	4	14
5	8	12

Расчёт модели ЖСР-С

- С помощью программного комплекса ПРИЗМА+РИСК [2,3] проведён расчёт выхода в равновесный режим для выбранных вариантов модели ЖСР-С (при расчетах использовалась библиотека ENDF-B-VII.1).

Вариант	Кэфф	Погрешность (1 σ), %	Утечка нейтронов, %	Средняя энергия потока нейтронов, кэВ	Средне медианная энергия, кэВ
1	1.019	0.06	24	663	894
2	1.021	0.06	20	605	782
3	1.031	0.07	16	560	683
4	1.022	0.06	12	515	559
5	1.020	0.09	9	481	427



2. Кандиев Я.З., Малахов А.А., Серова Е.В., Спирина С.Г. Оценка эффектов малых возмущений в многовариантных расчетах по программе ПРИЗМА-Д. – Атомная энергия, 2005. т. 99, вып. 3, с. 203 – 210.

3. Модестов Д.Г. Программа решения задач ядерной кинетики РИСК-2014: Препринт РФЯЦ–ВНИИТФ № 243, 2014.

Константная погрешность

- ❑ Для оценки константной погрешности была выбрана модель с объёмом активной зоны 8 м³ и проведена серия расчётов с различными библиотеками нейтронных констант
- ❑ Среднее квадратичное отклонение в результатах $K_{эфф}$, полученных с помощью различных библиотек, составляет 3,33%

Библиотека констант	$K_{эфф}$	Утечка нейтронов, %	Погрешность расчёта $K_{эфф}$ (1 σ), %
ENDF-B-VII.1	1.0201	9.4	0.06
ENDF-B-VII.0	1.0155	9.5	0.07
ENDF-B-VI.8	1.0236	9.1	0.05
ROSFOND	0.9811	9.0	0.06
JEFF-3.1.2	1.0716	9.6	0.06
JENDL-4	0.9818	9.0	0.08

Стенд ФКБН-2

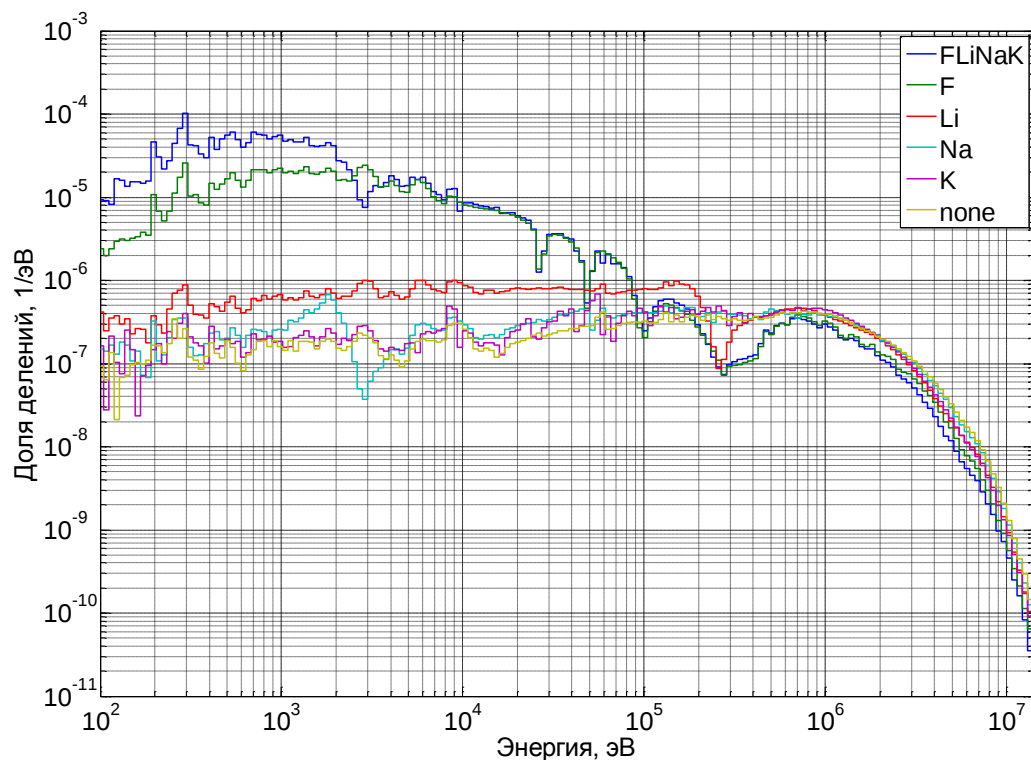
- ❑ Стенд ФКБН-2, созданный в РФЯЦ ВНИИТФ, предназначен для определения критического на запаздывающих нейтронах состояния РС.
- ❑ В исследуемых РС используются детали из делящихся и инертных материалов. За время эксплуатации стенда были проведены критические эксперименты с большим числом РС различного состава и геометрии, в том числе и по реакторной тематике.



- ❑ Собираемая РС состоит из двух частей: неподвижной (верхней) и подвижной (нижней).
- ❑ Контроль за состоянием собираемой системы осуществляется по выходящему нейтронному потоку.
- ❑ Масса РС может составлять до 3000 кг, а её внешние размеры до 150 см.
- ❑ Дополнительно к критическим экспериментам на стенде ФКБН-2 проводятся спектральные измерения и измерения характеристик нестационарных нейтронных процессов.

Особенности спектра делений в реакторе ЖСР-С

- Спектр делений испытывает влияние характерных резонансов сечения рассеяния (данные взяты из программы JANIS с библиотекой ENDF-B-VII.0)

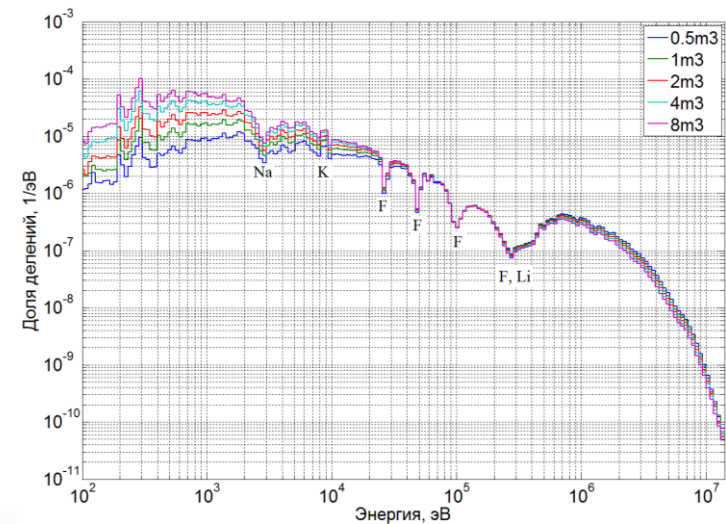
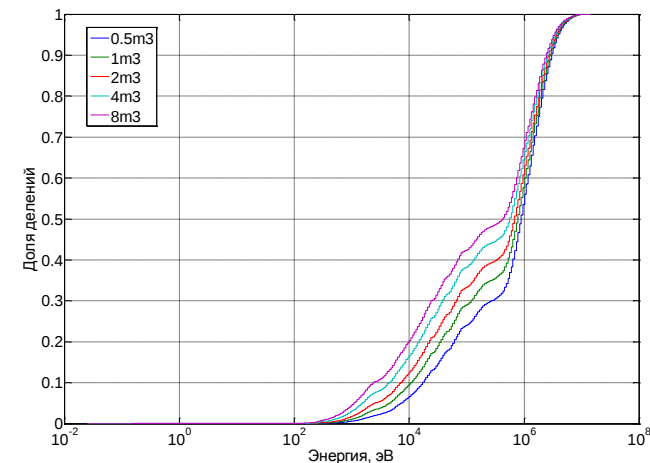


Изо- топ	Энергия резонанса, эВ	Полное сечение, барн	Сечение упругого рассеяния, барн
^{41}K	2.03E+3	382.7	232.1+c
^{23}Na	2.81E+3	378.5	378.2
^{39}K	9.37E+3	171.0	163.5
^{41}K	5.51E+3	182.8	179.8
^{19}F	2.70E+4	136.1	135.7
^{19}F	4.89E+4	47.4	47.4
^{19}F	9.80E+4	25.3	25.3
^7Li	2.60E+5	11.8	11.8
^{19}F	2.72E+5	13.6	8.2+in
^{19}F	2.82E+5	12.0	8.2+in
^{19}F	3.85E+5	17.8	14.8+in
^{19}F	4.20E+5	12.9	10.4+in



Спектр потока нейтронов ЖСР-С

- ❑ Основная часть делений происходит при энергиях нейтронов от 100 эВ до 10 МэВ;
- ❑ В работе подбирались такие РС, основное число делений в которых происходит при тех же энергиях нейтронов, и которые обладали бы такими же спектральными особенностями, как и ЖСР-С
- ❑ В работе представлены варианты РС, элементы которых выполнены из обогащенного и обедненного урана, солевого растворителя FLiNaK, Fe, BeO и полиэтилена
- ❑ Имеется возможность создания РС с деталями центральной части и отражателя, выполненными из Pu, Be, Pb, Al, Ti, Mo, Ni, Nb, W



Плотность соли

- ❑ Технология производства солевых дисков пока не определена. Рассматриваются варианты изготовления дисков из застывшего расплава, покрытого оболочкой, или из порошка, засыпаемого в кожух.
- ❑ Плотность соли в разных технологических вариантах изготовления дисков может варьироваться примерно от 1.7 г/см^3 до 2.3 г/см^3 .
- ❑ Изменение плотности топливной соли в расчетной модели ФКБН можно компенсировать изменением толщины солевых дисков.
- ❑ Во всех расчётах сборок ФКБН плотность соли была принята равной 1.7 г/см^3 .

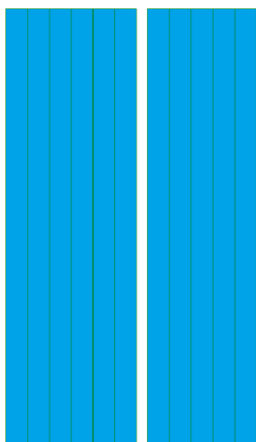
Сборки без отражателя

❑ Был проведён расчёт 3-х конфигураций сборок без отражателя:

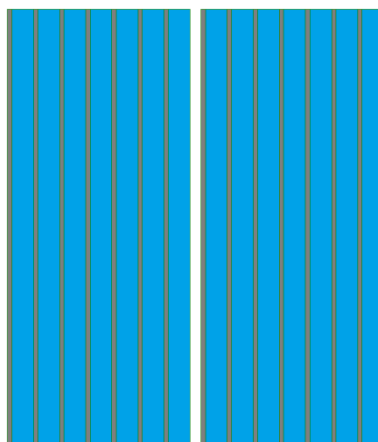
❑ 6UH5U

❑ 7(SU)H7(SU) толщина диска соли 0.2 см

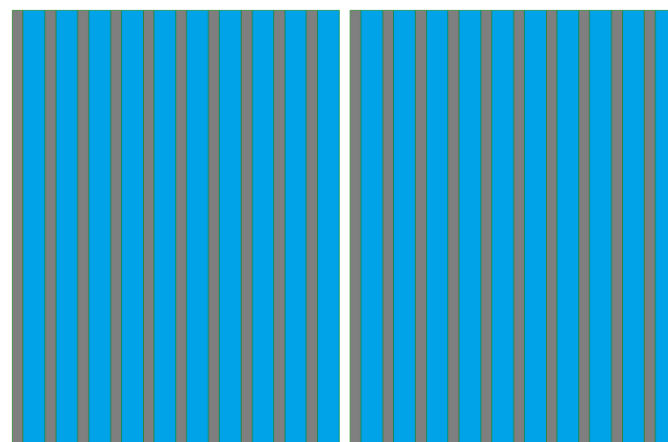
❑ 10(SU)H10(SU) толщина диска соли 0.5 см



❑ 1

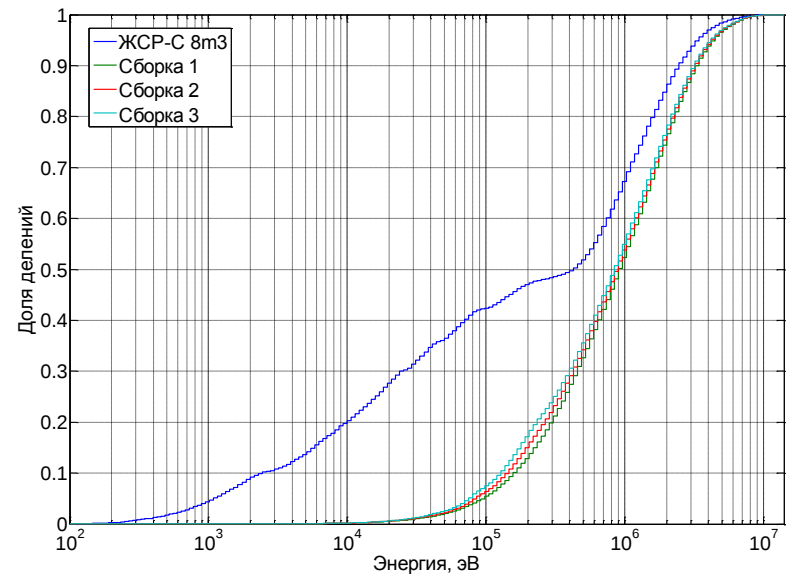
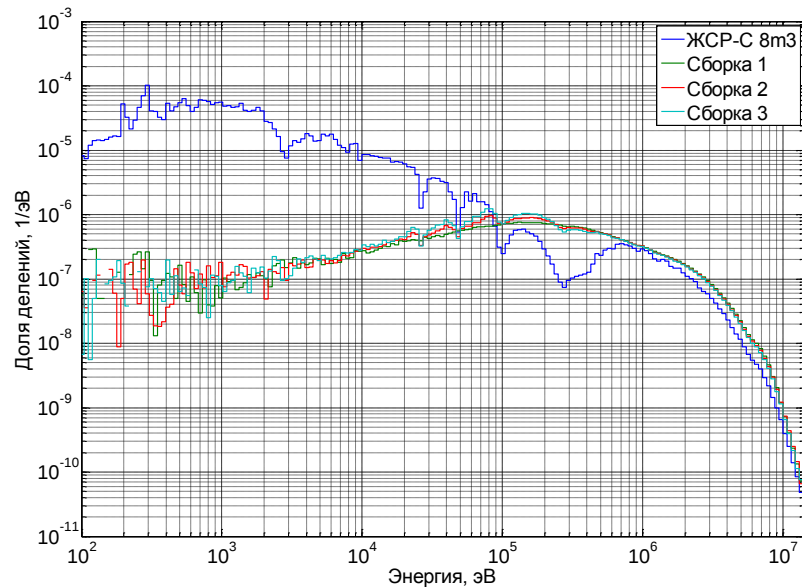


❑ 2



❑ 3

Сборки без отражателя



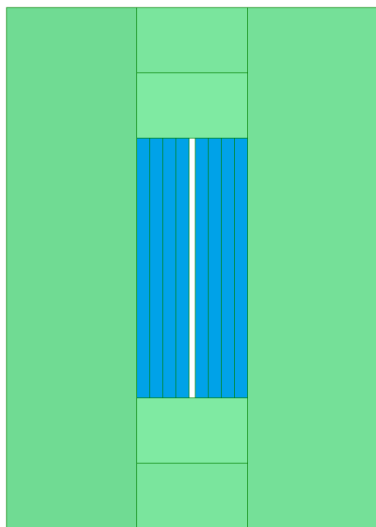
Сборка	Кэфф	Погрешность расчёта Кэфф (1σ), %	Утечка нейтронов, %	Средняя энергия нейтронов, кэВ		Мольная доля урана, %
				в уране	в соли	
1	0.9988	0.06	58	1470	-	100
2	1.0185	0.05	57	1430	1418	90
3	1.0028	0.05	57	1397	1376	79



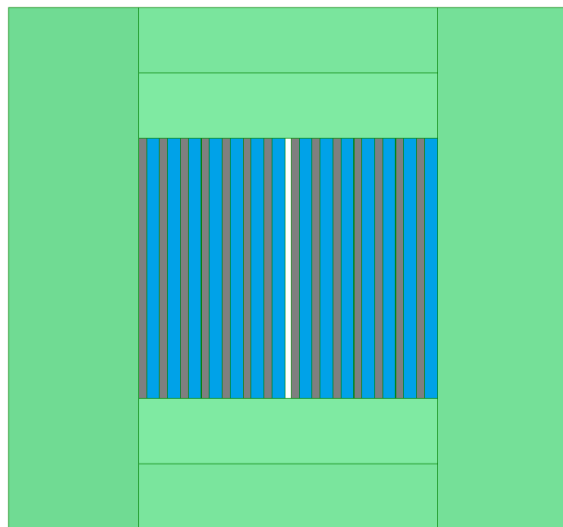
Сборки с отражателем из соли

❑ Был проведён расчёт 3-х конфигураций сборок с отражателем из соли толщиной 10 см:

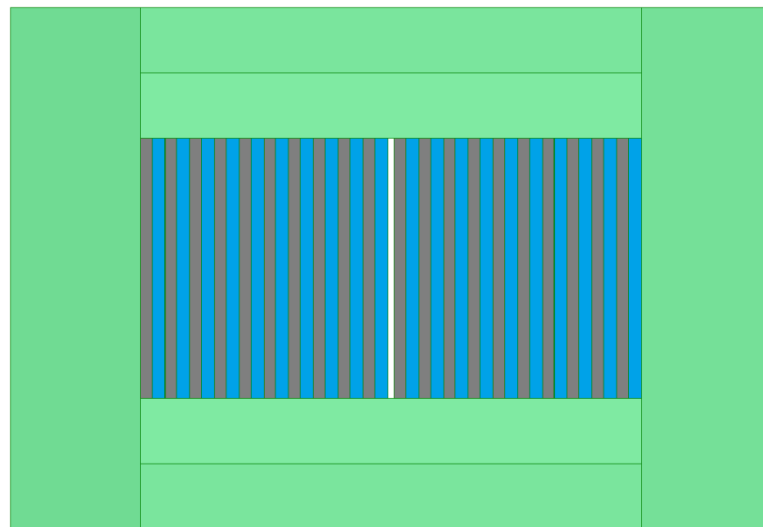
1. 4UH4U
2. 7(SU)H7(SU) толщина диска соли 0.6 см
3. 10(SU)H10(SU) толщина диска соли 0.9 см



❑ 1

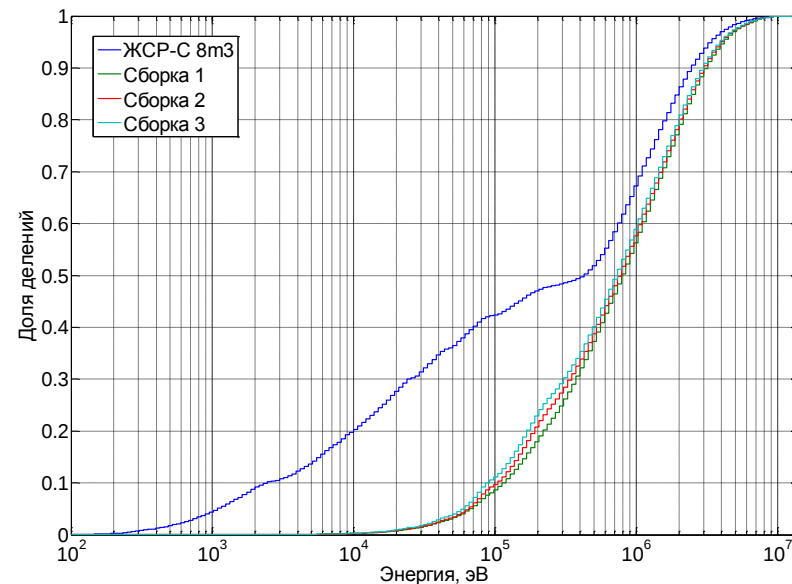
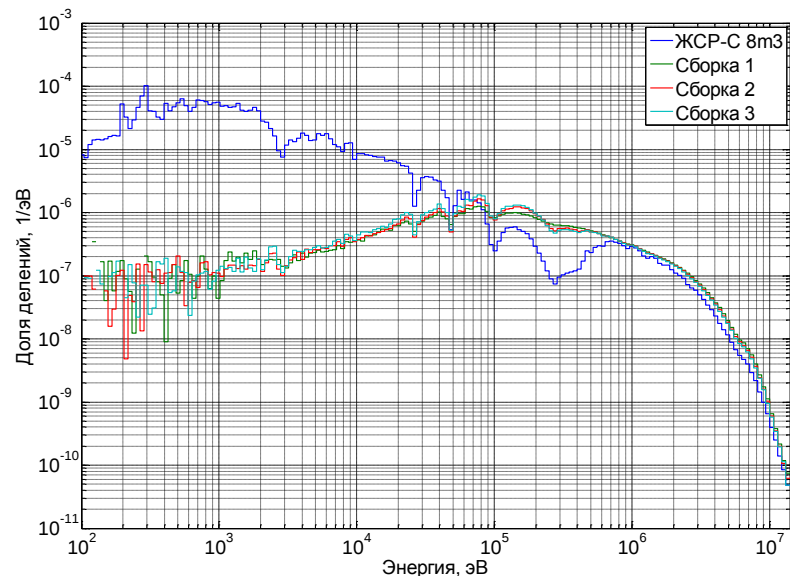


❑ 2



❑ 3

Сборки с отражателем из соли



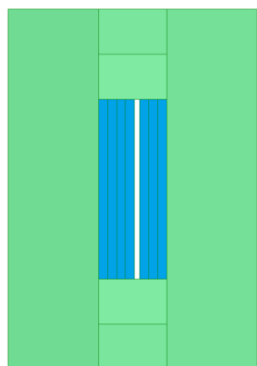
Сборка	Кэфф	Погрешность расчёта Кэфф (1σ), %	Утечка нейтронов, %	Средняя энергия нейтронов, кэВ		Мольная доля урана, %
				в уране	в соли	
1	1.0159	0.06	55	1365	-	100
2	1.0095	0.06	56	1321	1293	76
3	1.0035	0.06	55	1289	1251	67



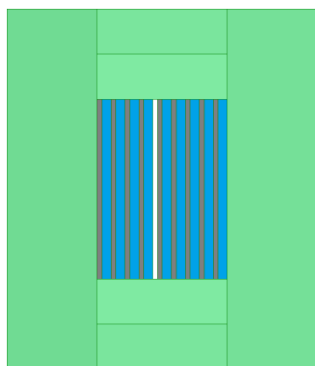
Сборки со стальным отражателем

□ Был проведён расчёт 4-х конфигураций сборок со стальным отражателем толщиной 10 см:

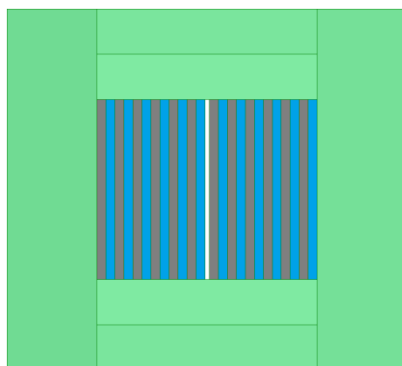
1. 4УНЗУ
2. 4(SU)Н5(SU) толщина диска соли 0.55 см
3. 6(SU)Н6(SU) толщина диска соли 1 см
4. 10(SU)Н10(SU) толщина диска соли 1.5 см



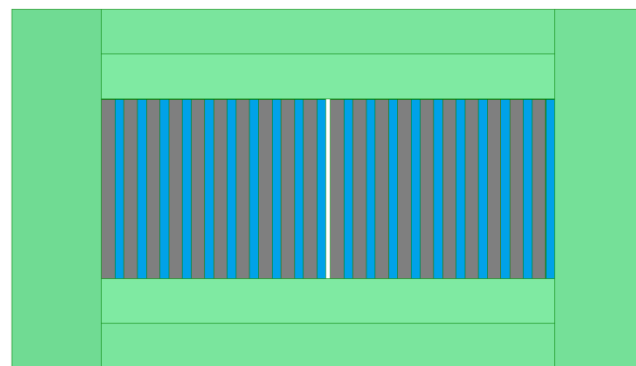
□ 1



□ 2

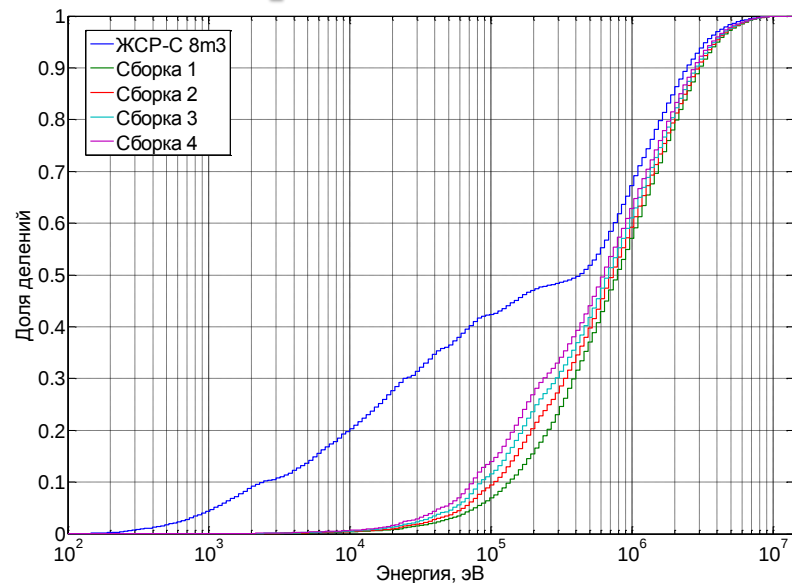
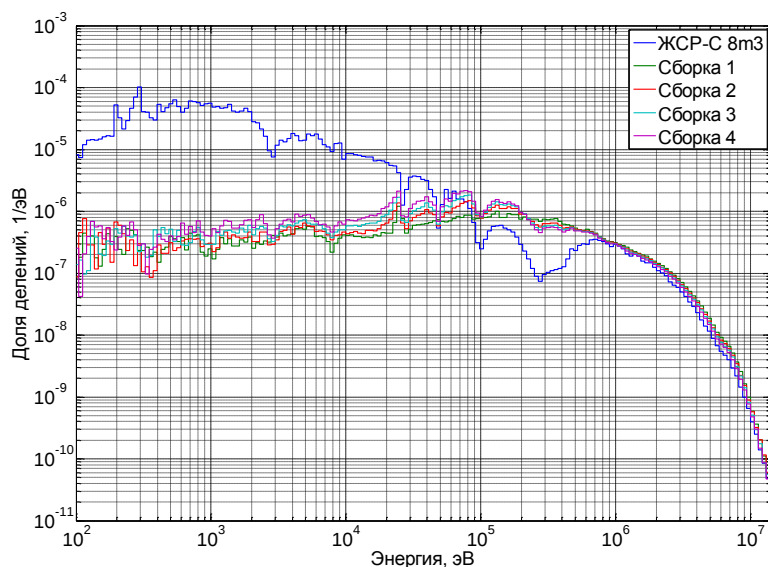


□ 3



□ 4

Сборки со стальным отражателем



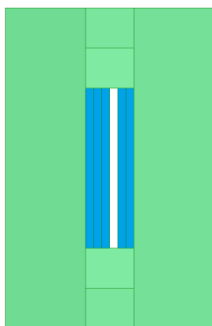
Сборка	Кэфф	Погрешность расчёта Кэфф (1 σ), %	Утечка нейтронов, %	Средняя энергия нейтронов, кэВ		Мольная доля урана, %
				в уране	в соли	
1	1.0047	0.07	56	1335	-	100
2	1.0059	0.07	55	1277	1246	78
3	1.0017	0.07	55	1233	1190	65
4	1.0012	0.06	54	1186	1130	56



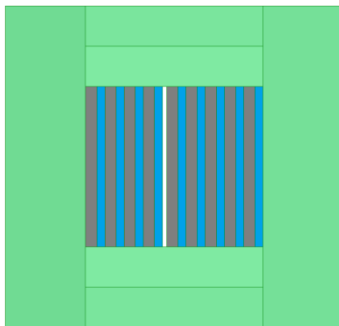
Сборки с отражателем из обеднённого урана

□ Был проведён расчёт 4-х конфигураций сборок с отражателем из обеднённого урана толщиной 10 см:

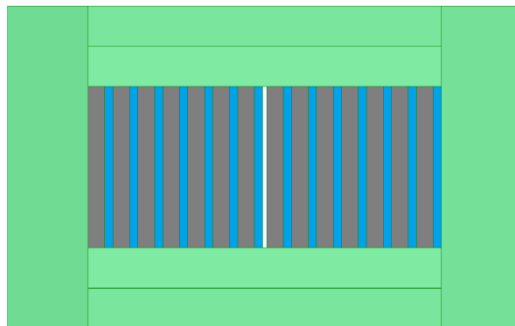
1. 3UH2U
2. 4(SU)H5(SU) толщина диска соли 1.4 см
3. 7(SU)H7(SU) толщина диска соли 2.1 см
4. 10(SU)H10(SU) толщина диска диска соли 2.46 см



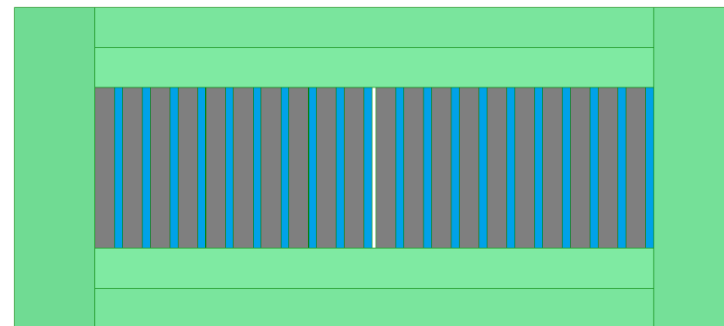
□ 1



□ 2

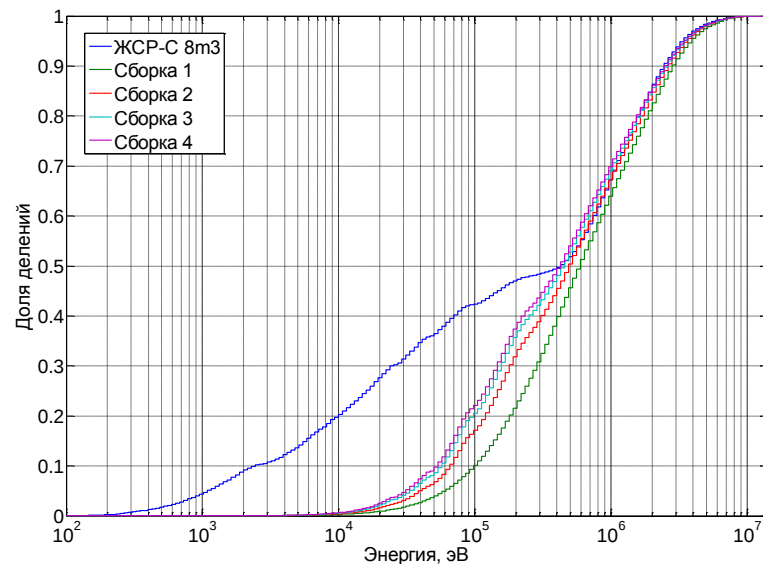
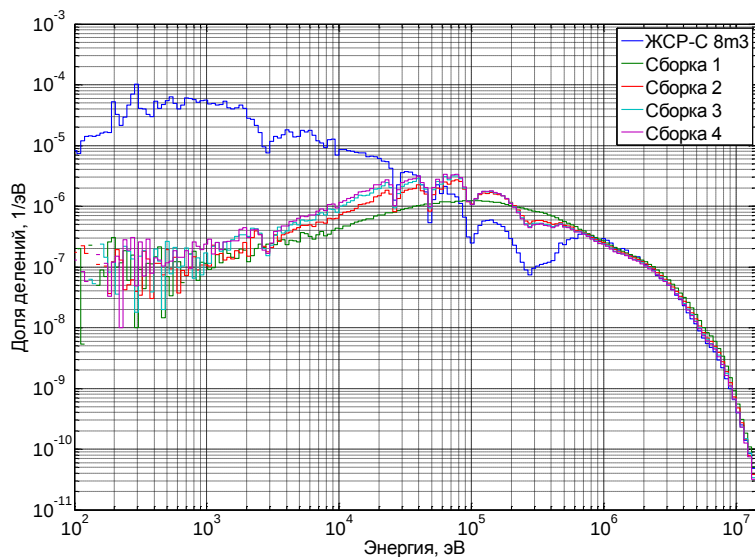


□ 3



□ 4

Сборки с отражателем из обеднённого урана



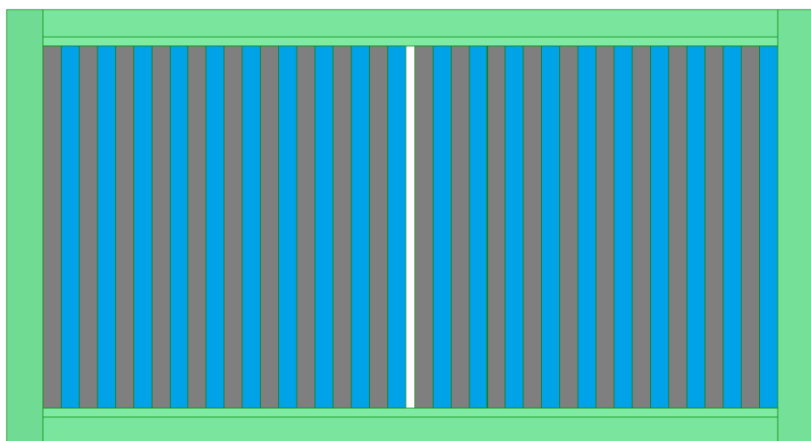
Сборка	Кэфф	Погрешность расчёта Кэфф (1 σ), %	Утечка нейтронов, %	Средняя энергия нейтронов, кэВ		Мольная доля урана, %
				в уране	в соли	
1	1.0226	0.07	43	1194	-	100
2	1.0068	0.06	41	1098	1033	58
3	1.0042	0.06	39	1053	970	47
4	1.0003	0.09	39	1032	943	44



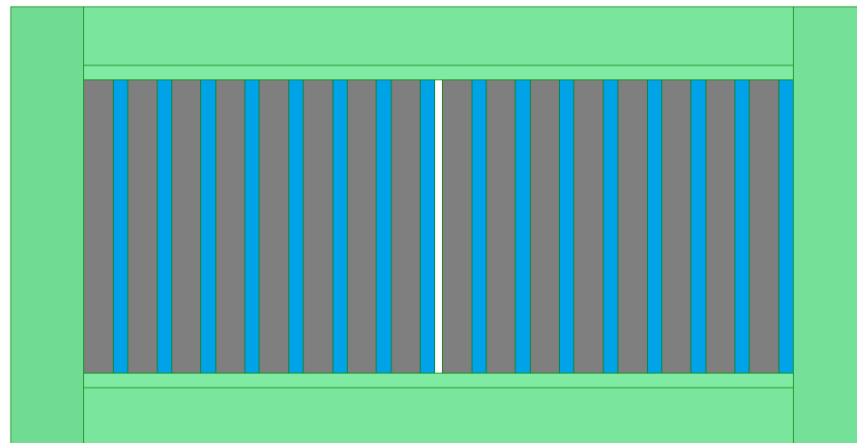
Сборки с отражателем из полиэтилена и BeO

□ Был проведён расчёт 2-х конфигураций сборок с отражателем из полиэтилена и BeO:

1. 10(SU)H10(SU) толщина диска соли 1 см (толщина отражателя из полиэтилена 2 см)
2. 8(SU)H8(SU) толщина диска соли 2 см (толщина отражателя из BeO 5 см)

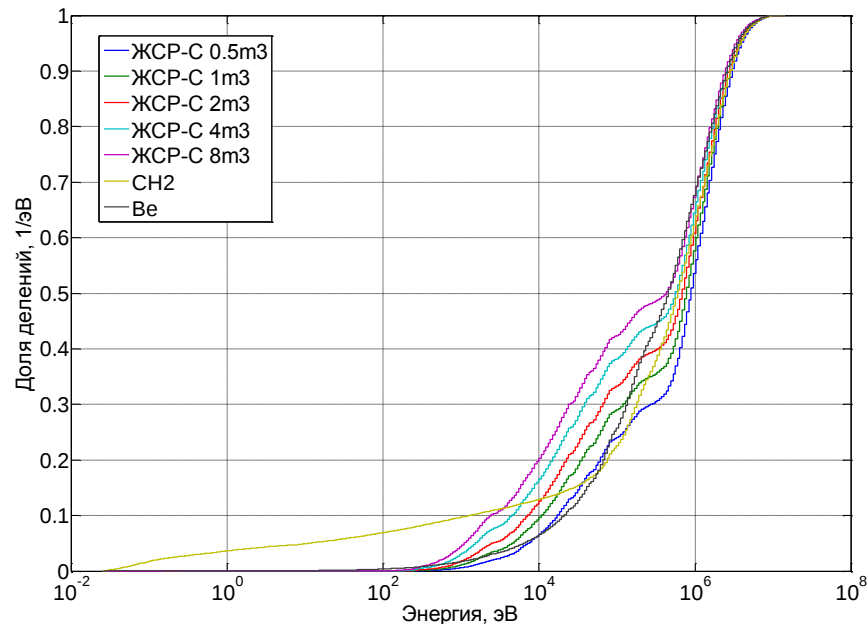
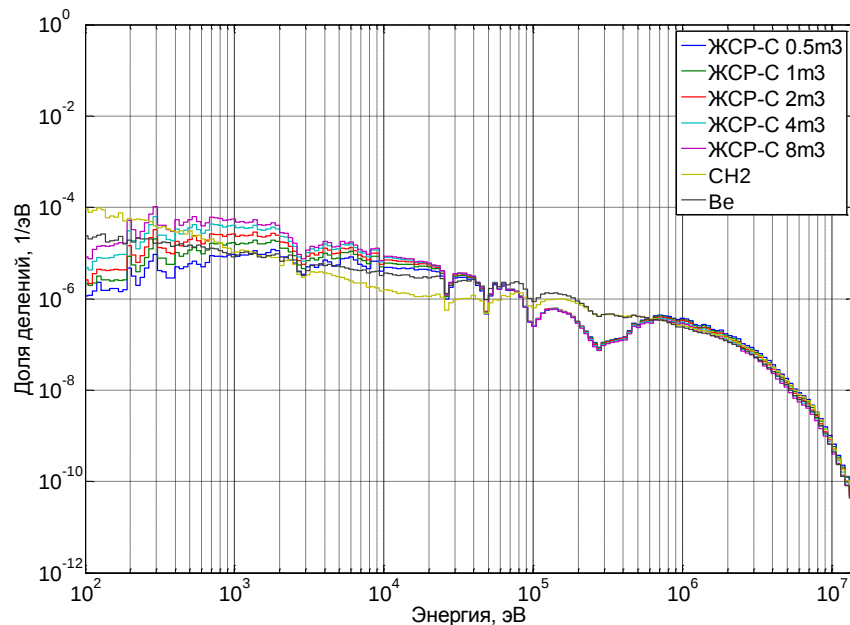


□ 1 (полиэтилен)



□ 2 (BeO)

Сборки с отражателем из полиэтилена и BeO



Сборка	Кэфф	Погрешность расчёта Кэфф (1 σ), %	Утечка нейтронов, %	Средняя энергия нейтронов, кэВ		Мольная доля урана, %
				в уране	в соли	
1	0.9929	0.06	54	1328	1279	65
2	0.9963	0.06	55	1113	1030	49



Исследования нейтронных полей на стенде ФКБН-2: нейтронно-активационные детекторы

п/п	Реакция активации	Атомный вес	Содерж. изотопа, %	Область чувств.	$T_{1/2}$	E_γ , МэВ (выход на 100 распадов)	ρ , г/см ³	Размеры, мм
1	$^{113}\text{In}(n,\gamma)^{114\text{m}}\text{In}$	114,8	4,28	0,025 эВ	49,51 дня	0,190(17)	7,31	Ø20x1
2	$^{197}\text{Au}_{79}(n,\gamma)^{198}\text{Au}_{79}$	196,9	100	4,9 эВ	2,696 дня	0,412(95)	19,3	Ø20x0,01
3	$^{63}\text{Cu}(n,\gamma)^{64}\text{Cu}$ $^{65}\text{Cu}(n,2n)^{64}\text{Cu}$	63,55	30,83	579 эВ	12,70 час	0,511(38)	8,96	Ø20x0,1
4	$^{45}\text{Sc}_{21}(n,\gamma)^{46}\text{Sc}_{21}$	44,96	100	7,17 кэВ	83,83 дня	0,889(100), 1,120(100)	2,99	Ø20x0,1
5	$^{115}\text{In}(n,n')^{115\text{m}}\text{In}$	114,8	95,72	>1,2 МэВ	4,486 час	0,336(47)	7,31	Ø20x1
6	$^{47}\text{Ti}(n,p)^{47}\text{S}$ $^{48}\text{Ti}(n,np)^{47}\text{S}$	47,88	7,3	>2,2 МэВ	3,35 дня	0,159(73)	4,50	Ø20x1
7	$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$	58,69	68,27	>2,6 МэВ	70,78 дня	0,81(99)	8,91	Ø20x1
8	$^{24}\text{Mg}(n,p)^{24}\text{Na}_{11}$	24,31	78,99	>7,2 МэВ	15,02 час	1,369(100)	1,73	Ø20x1
9	$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	26,98	100	>7,4 МэВ	15,02 час	1,369(100)	8,96	Ø20x2
10	$^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$	92,91	100	>10,5 МэВ	10,15 дня	0,934(99)	8,57	Ø10x0,01
11	$^{19}\text{F}(n,2n)^{18}\text{F}$	19,0	100	>12,8 МэВ	109,8 мин	0,511(194)	~2,2	Ø20x2



Исследования нейтронных полей на стенде ФКБН-2: нейтронно-активационные детекторы

- ❑ Измерения наведенной активности всех перечисленных выше нейтронно-активационных детекторов выполняют методом гамма-спектрметрии.
- ❑ Основными средствами измерений являются эталонные гамма-спектрометрические комплексы высокого разрешения с полупроводниковыми детекторами GEM30P4-70 и GMX45P4-83-SMN.
- ❑ Погрешности измерений активности и расчета активационных интегралов (число реакций на ядро изотопа-мишени) не должны превышать 3,5...5 % при доверительной вероятности $P=0,95$. Данные значения являются минимально достижимыми при использовании калибровочных гамма-источников ОСГИ имеющих погрешности радионуклидов равные 3 % при $P=0,95$. Точность измерений возможно повысить при использовании ОСГИ с погрешностями 1..1,5 %.



Исследования нейтронных полей на стенде ФКБН-2: детекторы на основе делящихся материалов

- Возможно изготовление детекторов из плутония-239, нептуния-237 и урана методом напыления. Измерения числа делений выполняют трековым методом с регистрацией осколков делений на природной слюде. Погрешность измерений чисел делений составляет 4...6 %.

№	Изотоп	A, Бк	dA, %	$\lambda, \text{с}^{-1}$	Нядер	Eff, МэВ	σ, barn	$\Phi_n, \text{см}^{-2}$	Nделений
1	U-235	1.85E+01	5.4	3.09E-17	5.99E+17	>1	1.2	2.00E+10	1.44E+04
		1.76E+01	5.7	3.09E-17	5.70E+17	>1	1.2	2.00E+10	1.37E+04
2	U-238	3.03E+00	3.3	4.87E-18	6.22E+17	1.6	0.574	3.00E+10	1.07E+04
		1.89E+00	5.3	4.87E-18	3.88E+17	1.6	0.574	6.00E+10	1.34E+04
3	Np-237	8.55E+03	2.0	1.03E-14	8.30E+17	0.6	1.62	1.00E+10	1.34E+04
		5.75E+03	2.2	1.03E-14	5.58E+17	0.6	1.62	1.00E+10	9.04E+03
4	Pu-238	5.43E+06	1.8	2.54E-10	2.14E+16				
5	Pu-239	6.75E+05	3.3	9.02E-13	7.48E+17	>1	1.7	1.00E+10	1.27E+04
		5.71E+05	3.2	9.02E-13	6.33E+17	>1	1.7	1.00E+10	1.08E+04
6	Pu-240	1.55E+06	3.9	3.52E-12	4.40E+17	>1	1.5	2.00E+10	1.32E+04
		1.29E+06	3.9	3.52E-12	3.66E+17	>1	1.5	2.00E+10	1.10E+04
7	Pu-241	3.35E+03	5.7	1.42E-09	2.36E+12				
		7.06E+03	4.2	1.42E-09	4.98E+12				
8	Pu-242	3.33E+04	3.6	5.43E-14	6.14E+17				
		3.23E+04	3.7	5.43E-14	5.95E+17				
9	Am-241	3.74E+06	4.0	4.80E-11	7.79E+16	>1	1.2	1.00E+11	9.35E+03



Заключение

- ❑ Константная погрешность при расчётах ЖСР-С достигает порядка 3% в определении $K_{\text{эфф}}$.
- ❑ Для моделирования спектральных характеристик ЖСР-С подбирались такие конфигурации РС основное число делений в которых происходит при тех же энергиях нейтронов, и которые обладали бы такими же спектральными особенностями, как и ЖСР-С
- ❑ Размножающие системы без отражателя и с отражателями из топливной соли, стали и обедненного урана позволяют моделировать спектральные особенности ЖСР-С, начиная с энергий ~ 10 кэВ. При этом доля делений нейтронами до 10 кэВ в рассматриваемых РС составляет менее 1%, в то время как в ЖСР-С с солью FLiNaK может составлять до ~ 20 %.
- ❑ Для увеличения доли делений в области энергий от 10^2 до 10^4 эВ целесообразно использовать в качестве отражателя полиэтилен, либо BeO.
- ❑ Адекватность описания спектральных особенностей ЖСР-С целесообразно исследовать при различных конфигурациях РС с различными отражателями нейтронов.
- ❑ Для экспериментального измерения спектральных характеристик ЖСР-С произведен предварительный выбор нейтронно-активационных детекторов.
- ❑ Для проведения измерений спектральных характеристик также предполагается использовать детекторы на основе делящихся материалов.



Спасибо за внимание!