

Ордена Ленина  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ  
им. М.В. Келдыша  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

**Воронков А.В., Земсков Е.А., Новикова Н.Н., Сычугова Е.П.**

**РАСЧЕТ ПО ПРОГРАММНОМУ КОМПЛЕКСУ REACTOR-S ТЕСТА  
ДЛЯ ГИБРИДНЫХ ЯДЕРНЫХ СИСТЕМ IAEA-ADS BENCHMARK**

Москва-2000

## АННОТАЦИЯ

Для проведения расчетных исследований в рамках программы по проблеме электроядерной энергетики и трансмутации радиоактивных отходов в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН (ИПМ РАН) были адаптированы или частично созданы вновь необходимые программные средства, объединенные в программный комплекс REACTOR-S, что позволило включиться в расчетные исследования по проблеме гибридных ядерных систем.

Для верификации этого программного комплекса привлечен международный комплексный тест IAEA-ADS-Neutronic Benchmark, созданный рабочей группой при МАГАТЭ в рамках программы по гибридным ядерным системам (Coordinated Research Program on ADS (Accelerator Driven System)).

В данной работе приведены основные результаты по расчету этого теста, выполненные в ИПМ им. М.В. Келдыша, и сравнение их с результатами, полученными в других научных коллективах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда  
Фундаментальных исследований (№ Проекта 00-01-00290)

Voronkov A.V., Zemskov E.A., Novikova N.N., Sychugova E.P.

### CALCULATION OF A TEST FOR HYBRID NUCLEAR SYSTEMS IAEA- ADS BENCHMARK WITH THE PROGRAM PACKAGE REACTOR-S

#### ABSTRACT

In the Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS (KIAM RAS) the necessary software united in the REACTOR-S program package were adapted and partially created again to fulfill the researches in the field of electro-nuclear power engineering and transmutation of radioactive scraps. It has permitted to fulfill the numerical researches on the problem of hybrid nuclear systems.

For verification of this program package the international complex test IAEA-ADS-Neutronic Benchmark was used, which was created by the workgroup of MAGATE within the framework of the Coordinated Research Program on ADS (Accelerator Driven System) on hybrid nuclear systems.

In the given work the main results carried out in the KIAM are given on solving of this Benchmark, and the comparison of obtained results with the results of other scientific groups is also given.

This work was supported by the Russian Foundation for Fundamental  
Investigations (Project # 00-01-00290)

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

Введение	4
1. Расчет теста ADS-Neutronic Benchmark IAEA (часть 1)	5
1.1. Описание расчетной модели	5
1.2. Результаты расчетов ADS- теста, часть 1	8
2. Расчет теста ADS-Neutronic Benchmark IAEA (часть 2)	11
2.1. Описание расчетной модели	12
2.2. Результаты расчетов ADS-теста, часть.2	15
2.2.1. Расчеты без внешнего источника	15
2.2.2. Расчеты начального состояния с внешним источником	17
2.2.3. Расчеты выгорания в подкритическом бланкете с внешним источником	20
Заключение	23
Литература	23

## Введение

В настоящее время активно разрабатывается концепция так называемых гибридных ядерных систем (ускоритель-мишень-подкритический бланкет), обладающих внутренне присущей ядерной безопасностью [1-3]. Эти системы рассматриваются как установки для производства энергии, так и трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов ядерной энергетики.отходов.

Нейтронно-физический расчет таких систем имеет ряд особенностей по сравнению с традиционными расчетами ядерных реакторов. Первая из них новая задача для традиционной нейтронной физики ядерных реакторов - расчет выходов и спектров нейтронов и фотонов из мишени, облучаемой пучком протонов (spallation реакции). Вторая задача- расчет подкритической системы мишень- бланкет с заданным в объеме мишени распределенным внешним источником нейтронов. Эта задача, несмотря на свою кажущуюся известность, требует доработки программных средств расчета. В подкритической системе нужно говорить уже не об эффективном коэффициенте размножения  $K_{эфф}$ , а коэффициенте мультипликации  $K_S$ , необходимую мощность источника нейтронов нужно определять через мощность бланкета, оперировать понятием ценности (эффективности) нейтронов источника и др.

Для решения этих новых задач в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН в рамках программы по проблеме электроядерной энергетики и трансмутации радиоактивных отходов были адаптированы или частично созданы вновь необходимые программные средства, объединенные в программный комплекс REACTOR-S, что позволило включиться в расчетные исследования по проблеме гибридных ядерных систем.

В 1996 году рабочей группой при МАГАТЭ в рамках программы по гибридным ядерным системам (Coordinated Research Program on ADS (Accelerator Driven System)) был сформулирован комплексный тест ADS-Neutronic Benchmark [4] по расчету варианта гибридной системы со свинцовой мишенью, бланкетом с топливом  $^{233}\text{U} + ^{232}\text{Th}$  и свинцом в качестве теплоносителя. Этот тест оказался представительным для верификации различных расчетных программ по определению основных нейтронно-физических характеристик систем, предназначенных для производства энергии. Затем этот тест был дополнен второй частью [5], в которой предлагалось рассчитать нейтронно-физические характеристики двух гибридных систем, различающихся обогащением топлива трансурановыми элементами. Эта часть теста направлена на изучение потенциальных возможностей гибридных ядерных систем по трансмутации отходов ядерной энергетики.

В данной работе приведены основные результаты по расчету обеих частей этого теста, выполненные в ИПМ им. М.В. Келдыша, и сравнение их с результатами, полученными в других научных коллективах.

## 1. Расчет теста ADS-Neutronic Benchmark IAEA (часть 1)

В данном разделе приведено описание первой части теста и основные результаты по его расчету по разным программам.

### 1.1 Описание расчетной модели

Расчетная модель в (R,Z)- геометрии представлена на рис. 1.. Плоскость  $Z=0$  является плоскостью симметрии. Объемный внешний источник нейтронов, инициированный протонами с энергией 1Гэв, задан в цилиндрической области, заполненной свинцом радиусом 10 см. высотой 50 см., и расположен в центре системы. Мощность blankets 1500 МВт, длительность кампании 2250 суток, температура топливных зон 1200 К, остальных зон 900 К. Даны ядерные концентрации по зонам, однако для топливных зон задана суммарная концентрация ядер  $^{233}\text{U} + ^{232}\text{Th}$ .

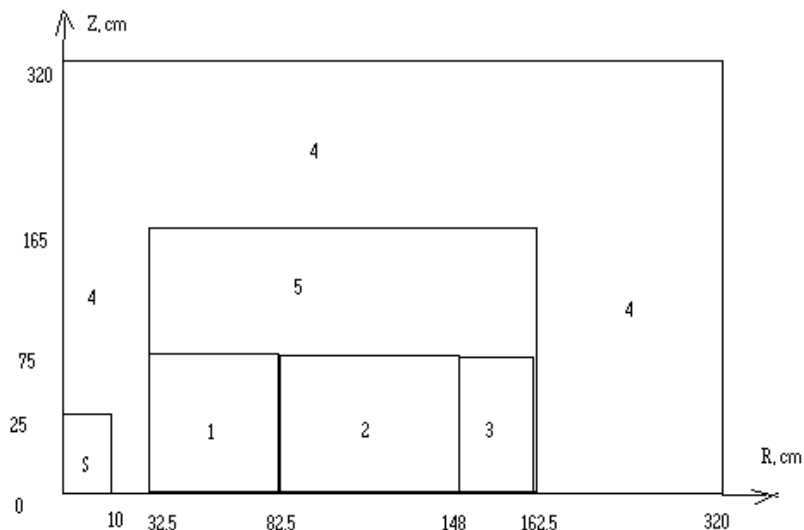


Рис. 1 (R,Z)- модель ADS-теста, часть 1

- 1.2 – топливные зоны с U-Th топливом и свинцовым теплоносителем,
- 3 – боковая зона с торием и свинцовым теплоносителем,
- 4 – свинец,
- 5 – торцевой отражатель

В тесте дан спектр нейтронов внешнего источника. Это "быстрый" спектр, характерный для нейтронов, нарождающихся в каскадных процессах при облучении мишени высокоэнергетическими протонами (spallation spectrum). Он приведен в таблице 1.

Таблица 1. Спектр нейтронов источника.

Номер Группы	Границы по энергии (МэВ)	Значение источника
1	19.64-4.99	0.1985
2	4.99 - 3.03	0.152
3	3.03 - 1.84	0.178
4	1.84 - 1.11	0.165
5	1.11 - 0.675	0.122
6	0.675 - 0.410	8.03E-02
7	0.410 - 0.248	4.82E-02
8	0.248 - 0.151	2.60E-02
9	0.151 - 9.14E-02	1.40E-02
10	9.14E-02 - 5.54E-02	7.59E-03
11	5.54E-02 - 3.36E-02	3.95E-03
12	3.36E-02 - 2.04E-02	2.02E-03
13	2.04E-02 - 1.24E-02	1.194E-03
14	1.24E-02 - 7.50E-03	5.70E-04
15	7.50E-03 - 4.55E-03	3.54E-04
16	4.55E-03 - 2.76E-03	1.23E-04
17	2.76E-03 - 1.67E-03	9.56E-05
18	1.67E-03 - 1.02E-03	7.56E-05
19	1.02E-03 - 6.16E-04	1.58E-05
20	6.16E-04 - 3.74E-04	3.99E-06
21	3.74E-04 - 1.37E-04	8.01E-06
22	1.37E-04 - 3.07E-05	0.
23	3.07E-05 - 4.15E-06	0.
24	4.15E-06 - 5.62E-07	0.
25	5.62E-07	0.

Спектр источника был проинтерполирован и отнормирован на единицу в принятом в реакторных расчетах 26-групповом представлении. Такой спектр приведен в таблице 2.

Таблица 2. Спектр источника ADS в 26 групповом виде.

Номер группы	Энергетические границы (MeV)	Значение источника $\varrho$
1	10.50-6.50	1.7804E-01
2	6.50-4.00	9.7235E-02
3	4.00-2.50	1.5450E-01
4	2.50-1.40	1.9817E-01
5	1.40-0.80	1.5249E-01
6	0.80-0.40	1.1833E-01
7	0.40-0.20	5.8091E-02
8	0.20-0.10	2.5114E-02
9	0.10-4.65E-02	1.1481E-02

10	4.65E-02-2.15E-02	4.3740E-03
11	2.15E-02-1.00E-02	1.6505E-03
12	1.00E-02-4.65E-03	6.6474E-04
13	4.65E-03-2.15E-03	1.8592E-04
14	2.15E-03-1.00E-03	1.2429E-04
15	1.00E-03-4.65E-04	1.7428E-05
16	4.65E-04-2.15E-04	6.1570E-06
17	2.15E-04-1.00E-04	3.5944E-06
18	1.00E-04-4.65E-05	0.
19	4.65E-05-2.15E-05	0.
20	2.15E-05-1.00E-05	0.
21	1.00E-05-4.65E-06	0.
22	4.65E-06-2.15E-06	0.
23	2.15E-06-1.00E-06	0.
24	1.00E-06-4.65E-07	0.
25	4.65E-07-2.15E-07	0.
26	2.15E-07-2.53E-08	0.

Ядерные концентрации материалов по зонам приведены таблице 3.

Таблица 3. Ядерные концентрации ( $\cdot 10^{-24}$  ядер/см<sup>3</sup>)

Нуклид	зона 1	зона 2	зона 3	зона 4	зона 5
<sup>232</sup> Th			7.45E-		
<sup>233</sup> U+ <sup>232</sup> T	6.35E-	7.45E-			
O	1.27E-	1.49E-	1.49E-2	1.49E-	
Fe	8.10E-	8.87E-	8.87E-		6.63E-
Cr	1.12E-	1.06E-	1.06E-		8.00E-
Mn	4.60E-	5.10E-	5.10E-		3.80E-
W	4.60E-	5.10E-	5.10E-		3.80E-
Pb	1.77E-	1.56E-	1.56E-	3.05E-	2.41E-

В тесте требуется определить:

1. процентное содержание <sup>233</sup>U в зонах 1 и 2 (обогащение по <sup>233</sup>U, одинаковое в обеих зонах) для трех уровней подкритичности: Кэфф = 0.98, 0.96, 0.94.
2. поведение Кэфф по кампании,
3. отравление протактинием в момент времени 150 суток, так называемый Ра-эффект реактивности, который определяется формулой

$$\Delta\rho = \frac{K_{eff}(0) - K_{eff}(150d)}{K_{eff}(0) \cdot K_{eff}(150d)},$$

4. величину внешнего источника нейтронов по кампании, необходимую для работы blankets на мощности 1500 МВт.

## 1.2 Результаты расчетов ADS- теста, часть 1

Результаты расчета пункта 1 по определению необходимого обогащения уран-ториевого топлива приведены в таблице 4. Для сравнения сначала приведены результаты других научных организаций, затем в последних двух строчках результаты ИПМ, полученные в диффузионном приближении и в расчете  $S_n$ - методом.

Таблица 4. Обогащение в %  $^{233}\text{U}$  топливных зон 1,2.

Страна, организация	Кэфф=0.9 8	Кэфф=0.9 6	Кэфф=0.9 4
Россия, ФЭИ, диффуз.	10.01	9.69	9.38
Россия, ФЭИ, МК	10.26	9.925	9.61
Швейцария, PSI	10.28	9.95	9.62
Италия, ENEA	10.29	9.96	9.63
Франция, CEA	10.27	9.94	9.61
Германия, FZK	10.0	9.68	9.36
Нидерланды, ECN	10.13	9.81	9.49
Япония, JAERI	9.7	9.4	9.1
Белоруссия, IRPCP	10.50	10.17	9.85
Швеция, RIT	10.42	10.10	9.77
Корея, EET	9.85	9.48	9.2
Россия, ИПМ, $S_n$ метод	10.28	9.95	9.62
Россия, ИПМ, диффуз. расчет	10.30	9.96	9.63

Расчеты по второму пункту отражены на рис. 2, на котором приведены графики изменения Кэфф по кампании в гибридной системе с первоначальным значением эффективного коэффициента размножения  $K_{эфф}=0.98$ . Значения Кэфф, рассчитанные в ИПМ, приведены также в таблице 5.



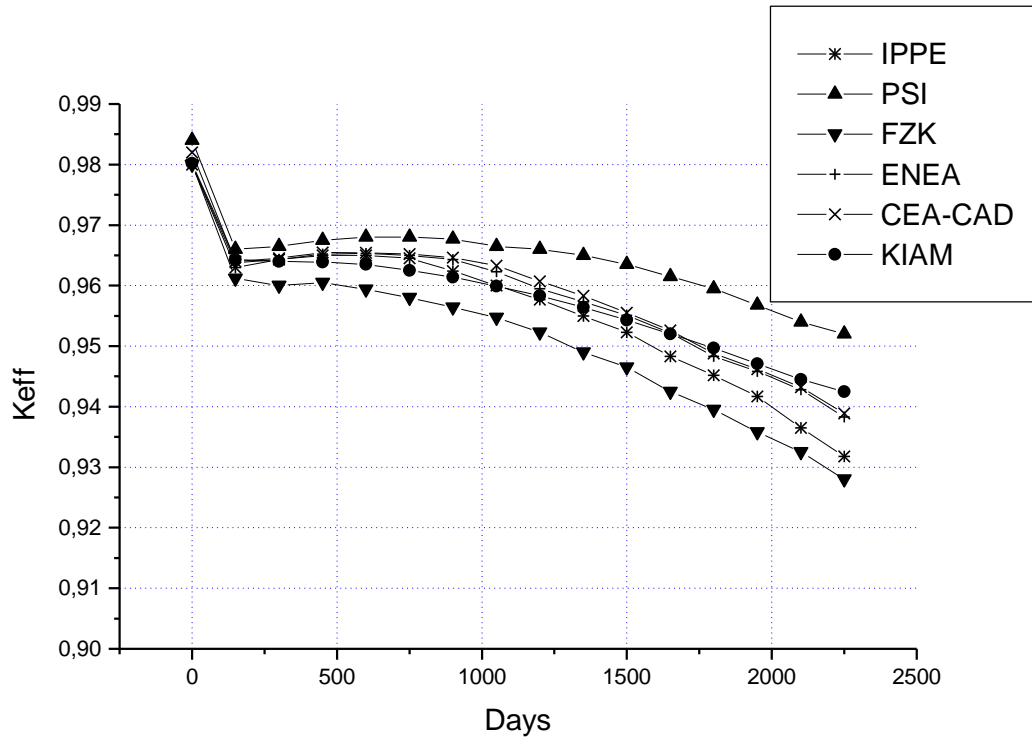


Рис. 2. Изменение  $K_{eff}$  по кампании.  
 IPPE – Россия, ФЭИ, PSI – Швейцария, FZK – Германия,  
 ENEA-Италия, CEA-CAD (Cadarache) – Франция,  
 KIAM – Россия, ИПМ (данная работа)

Таблица 5. Значения  $K_{eff}$  по времени.

Время сут.)	$K_{eff}$	Время (сут.)	$K_{eff}$
0	0.9802	1200	0.9583
150	0.9643	1350	0.9564
300	0.9640	1500	0.9543
450	0.9639	1650	0.9520
600	0.9635	1800	0.9497
750	0.9626	1950	0.9471
900	0.9614	2100	0.9445
1050	0.9599		

Расчет по третьему пункту эффекта отравления протактинием в интервале времени 0 - 150 дней (Ра-эффект) отражен в таблице 6.

Таблица 6. Ра- эффект на отрезке 150 дней.

	$\Delta\rho, \%$
ФЭИ, Россия	1.82
CE Cadarache, Франция	1.82
ENEA, Италия	1.705
FZK, Германия	1.97
PSI, Швейцария	1.66
ECN, Нидерланды	1.66
ИПМ, Россия (данная работа)	1.68

Результаты расчетов по четвертому пункту, в котором нужно было определить величину внешнего источника нейтронов для поддержания мощности blankets на уровне 1500 МВт в течение кампании, отражены на рис. 3 и в таблице 6.

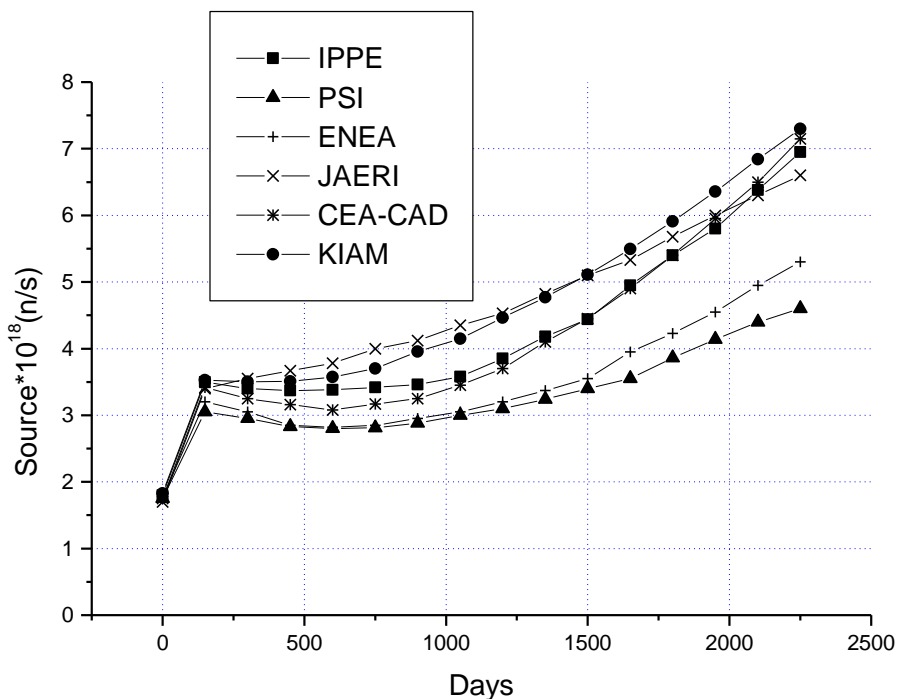


Рис. 3. Изменение мощности внешнего источника нейтронов по кампании.

IPPE – ФЭИ, Россия; PSI – Швейцария; ENEA – Италия; JAERI – Япония; CEA-CAD(Cadarache)- Франция, KIAM – ИПМ, Россия(настоящая работа)

Таблица 6. Значения мощности источника внешних нейтронов  $P_Q(t)$ .

Время (сут.)	$P_Q \cdot 10E + 18[n / sec]$	Время (сут.)	$P_Q \cdot 10E + 18[n / sec]$
0	1.825	1200	4.464
150	3.527	1350	4.768
300	3.603	1500	5.111
450	3.609	1650	5.493
600	3.676	1800	5.908
750	3.802	1950	6.357
900	3.975	2100	6.840
1050	4.200	2250	7.280

Показательной характеристикой точности расчетов источника внешних нейтронов является отношение мощности источника в конце кампании к его мощности в начале кампании. В ADS тесте предложено рассчитать это отношение для момента времени 1800 дней. Эти величины для сравнения приведены в таблице 7.

Таблица 7. Рост мощности внешнего источника нейтронов.

	$f = P_Q(1800) / P_Q(0)$
ФЭИ, Россия	3.50
CEA-Cadarache, Франция	3.23
ENEA, Италия	2.52
PSI, Швейцария	2.56
ИПМ, Россия (данная работа)	3.24

Из сравнения представленных расчетных результатов первой части ADS-теста следует, что программный комплекс REACTOR-S позволяет рассчитывать основные нейтронно-физические характеристики гибридных ядерных систем с точностью, сравнимой с зарубежными кодами.

## 2. Расчет теста ADS-Neutronic Benchmark IAEA (часть 2).

Во второй части ADS- теста предлагается рассчитать такие важные для концептуальных рассмотрений гибридных ядерных систем характеристики, как первоначальные загрузки делящихся изотопов, мощность бланкета,

скорость трансмутации технеция, влияние на интегральные характеристики (коэффициент мультипликации и ценность нейтронов источника) различных спектров нейтронов внешнего источника, темп выгорания по кампании и др.

В данном разделе проведено сравнение результатов расчетов по программному комплексу RACTOR-S с результатами, полученными в других научных организациях. Часть расчетных величин приведена без такого сравнения, так как по условиям теста не было предусмотрено их определение. Однако авторы сочли нужным представить этот материал, потому что он важен для понимания физики гибридных ядерных систем и может быть использован при дальнейшем тестировании программ.

## 2.1 Описание расчетной модели.

Геометрическая модель (R – Z геометрия) тестовой гибридной системы представлена на рис.4. На рисунке  $R_c$  обозначает радиус, который нужно определить из условия равенства эффективного коэффициента размножения  $K_{эфф} = 0.96$ .

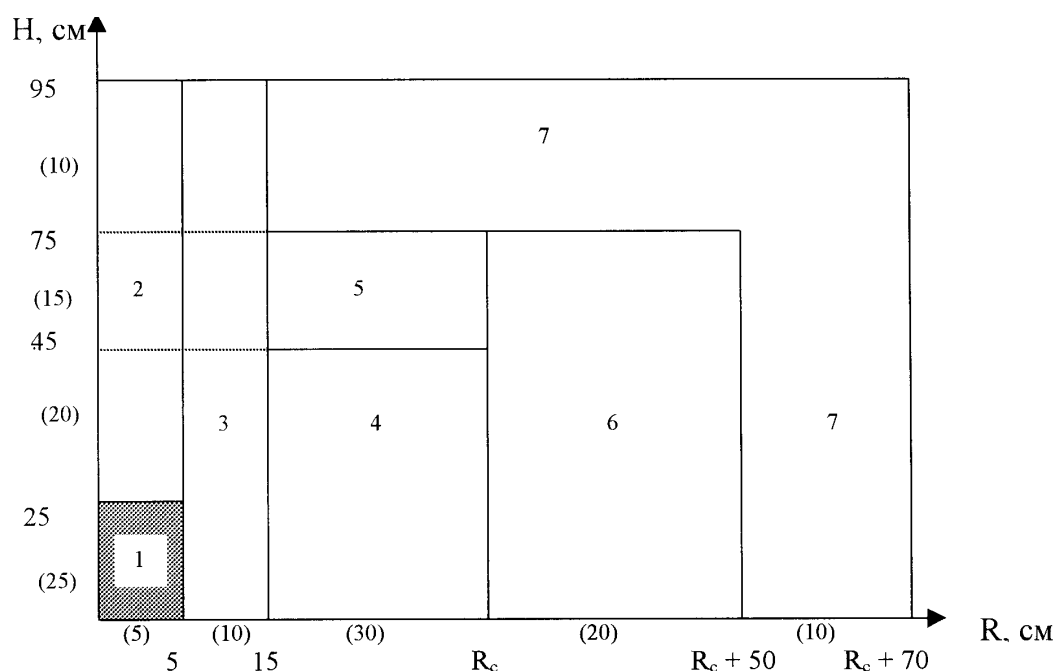


Рис.4.(R,Z) – геометрия расчетной модели 2-ой части ADS- теста.

1 – зона внешнего источника нейтронов

2, 3 – канал мишени

4 – активная зона blankets

5, 6 – экраны для трансмутации  $^{99}\text{Tc}$

7 – свинцовый отражатель

Цифры в скобках означают заданное число расчетных узлов.

В зоне 1 задан объемный внешний источник. В расчетах необходимо использовать 4 типа спектров источника:

1. Спектр, заданный на предыдущей стадии исследований ADS-benchmark (stage 1).
2. Моноэнергетический источник с энергией 10 МэВ.
3. Моноэнергетический источник с энергией 2 МэВ
4. Спектр деления  $^{239}\text{Pu}$

Таблица 8. Ядерные концентрации нуклидов в физических зонах  
( в ед.  $10^{24}$  яд/см<sup>3</sup>)

Зона	1	2	3	4		5	6	7
				TRU	MA			
$^{234}\text{U}$	-	-	-	0.134E-3	0.352E-4	-	-	-
$^{235}\text{U}$	-	-	-	0.228E-5	0.620E-5	-	-	-
$^{236}\text{U}$	-	-	-	0.293E-5	0.489E-5	-	-	-
$^{237}\text{Np}$	-	-	-	0.151E-3	0.608E-3	-	-	-
$^{238}\text{Pu}$	-	-	-	0.157E-3	0.412E-3	-	-	-
$^{239}\text{Pu}$	-	-	-	0.810E-3	0.104E-4	-	-	-
$^{240}\text{Pu}$	-	-	-	0.897E-3	0.264E-3	-	-	-
$^{241}\text{Pu}$	-	-	-	0.326E-3	0.316E-4	-	-	-
$^{242}\text{Pu}$	-	-	-	0.402E-3	0.962E-4	-	-	-
$^{241}\text{Am}$	-	-	-	0.142E-3	0.325E-3	-	-	-
$^{242\text{m}}\text{Am}$	-	-	-	0.685E-5	0.215E-4	-	-	-
$^{243}\text{Am}$	-	-	-	0.205E-3	0.680E-3	-	-	-
$^{242}\text{Cm}$	-	-	-	0.619E-5	0.140E-4	-	-	-
$^{243}\text{Cm}$	-	-	-	0.293E-5	0.108E-4	-	-	-
$^{244}\text{Cm}$	-	-	-	0.106E-3	0.481E-3	-	-	-
$^{245}\text{Cm}$	-	-	-	0.163E-4	0.126E-3	-	-	-
$^{246}\text{Cm}$	-	-	-	0.108E-4	0.841E-4	-	-	-
$^{247}\text{Cm}$	-	-	-	0.130E-5	0.101E-4	-	-	-
$^{248}\text{Cm}$	-	-	-	0.652E-6	0.619E-5	-	-	-
$^{249}\text{Bk}$	-	-	-	-	0.326E-6	-	-	-
Осколк и	-	-	-	0.362E-3	0.362E-3	-	-	-
$^{99}\text{Tc}$	-	-	-	-	-	0.0209	0.0558	-
Pb	0.0305	-	0.0305	0.0183	0.0183	0.0183	0.00305	0.0275

Zr	-	-	-	0.0064	0.0064	-	-	-
Fe	-	-	-	0.00855	0.00855	0.00855	0.00855	0.00855
N	-	-	-	0.01	0.01	-	-	-
<sup>4</sup> He	-	3.0E-09	-	-	-	-	-	-

Предложено рассмотреть два типа топлива, загружаемого в активную зону подкритического бланкета:

- топливо, преимущественно содержащее плутоний, далее обозначенное как TRU (transuranic elements)- топливо;
- топливо с повышенным содержанием Np, Am и Cm, далее обозначенное как MA (minor actinides)-топливо.

Ядерные концентрации нуклидов в физических зонах приведены в таблице 8.

Расчеты были выполнены в 26-групповом диффузионном приближении с системой констант БНАБ-93 [7]. Соответствующее 26-групповое представление перечисленных выше спектров внешнего источника приведено в таблице 9.

Таблица 9. 26-групповое представление спектра внешнего источника нейтронов

Номер группы	Границы групп по энергии (МэВ)	Вариант спектра			
		1	2	3	4
1	10.5 – 6.5	0.1780	1.0	-	0.0188
2	6.5 – 4.0	0.0972	-	-	0.0931
3	4.0 – 2.5	0.1545	-	-	0.1864
4	2.5 – 1.4	0.1982	-	1.0	0.2686
5	1.4 – 0.8	0.1525	-	-	0.1991
6	0.8 – 0.4	0.1183	-	-	0.1376
7	0.4 – 0.2	0.0580	-	-	0.0596
8	0.2 – 0.1	0.0251	-	-	0.0233
9	0.1000 – 0.0465	0.0115	-	-	0.0092
10	0.0465 – 0.0215	0.4374E-2	-	-	0.0030
11	0.0215 – 0.0100	0.1651E-2	-	-	0.0009
12	0.100E-1 – 0.465E-2	0.6647E-3	-	-	0.0003
13	0.465E-2 – 0.215E-2	0.1859E-3	-	-	0.0001
14	0.215E-2 – 0.100E-2	0.1243E-3	-	-	-
15	0.100E-2 – 0.465E-3	0.1743E-4	-	-	-
16	0.465E-3 – 0.215E-3	0.6157E-5	-	-	-
17	0.215E-3 – 0.100E-3	0.3594E-5	-	-	-

18	0.100E-3 – 0.465E-4	-	-	-	-
19	0.465E-4 – 0.215E-4	-	-	-	-
20	0.215E-4 – 0.100E-4	-	-	-	-
21	0.100E-4 – 0.465E-5	-	-	-	-
...					
25	0.465E-6 – 0.215E-6	-	-	-	-
26	0.252E-7	-	-	-	-

Спектр № 1 получен пересчетом заданного спектра к границам групп стандартного в системе констант БНАБ 26-группового разбиения. Данные для спектра № 4 взяты из работы [7]. Спектры № 2 и 3 представлены как моноэнергетические источники со средней энергией, соответствующей 1-й и 4-й группам 26-группового разбиения. Таким образом, в описываемых ниже расчетах рассмотрены моноэнергетические источники с энергией ~ 8.3 Мэв и ~ 1.9 Мэв соответственно.

## 2.2 Результаты расчетов ADS-теста, часть 2

Расчеты характеристик тестируемой системы проведены с использованием пакета прикладных программ REACTOR-S в (R-Z)-геометрии в 26-групповом диффузионном приближении с системой констант БНАБ-93 /6/. В соответствии с номенклатурой нуклидов, имеющих в этой системе, в расчетах не учитывались  $^{246}\text{Cm}$ ,  $^{247}\text{Cm}$ ,  $^{248}\text{Cm}$  и  $^{249}\text{Bk}$ . В качестве обобщенных осколков приняты осколки  $^{239}\text{Pu}$ .

### 2.2.1 Расчеты без внешнего источника.

Первым этапом тестирования является определение радиуса активной зоны бланкета  $R_c$  (см. рис.4), при котором в системе без внешнего источника эффективный коэффициент размножения  $K_{\text{эфф}}$  равен 0.96.

Для полученной активной зоны требуется найти полную мощность

$$P = Q_a * V_{az}$$

при заданной удельной мощности  $Q_a = 0.6 * 10^{-3} \text{ Tw/m}^3$ , определить соответствующую "критическую загрузку"  $G_{m.a.}$  кг тяжелых атомов и удельную загрузку (Specific Fuel Inventory – *SFI*)

$$SFI = G_{m.a.} / P \text{ кг т.а./Tw.}$$

Кроме этого, здесь же определена начальная загрузка нуклида  $^{99}\text{Tc}$   $G_{Tc}$  в физических зонах 5 и 6, моделирующих экраны для трансмутации этого нуклида. В последующих расчетах выгорания (см. ниже) оценена скорость трансмутации  $^{99}\text{Tc}$ .

Результаты наших расчетов других организаций по определению размера активной зоны и ее характеристик для двух видов топлива представлены в таблицах 10, 11.

Таблица 10. Результаты для TRU-топлива.

Страна	Радиус зоны, см	Мощность, ТВт	Загрузка тяжелых атомов, кг	Удельная загрузка топлива, Кг т.а./ТВт	Скорость трансмутации Тс, кг/ТВт сут
ЕСN, Нидерланды	43.4	2.81E-04	609	2.16E+06	632
СЕА-Cadar. Франция	42.0	2.70E-04	600	2.20E+06	640
ФЭИ, Россия	43.8	2.87E-04	690	2.41E+06	640
ЕНЕА, Италия	43.3	2.80E-04	607	2.17E+06	655
КТN, Швеция	43.6	2.84E-04	645	2.16E+06	695
СИМАТ, Испания	42.7	2.71E-04	588	2.17E+06	590
ИПМ, Россия (данная раб.)	43.6	2.843E-04	624	2.194E+06	644

Таблица 11. Результаты расчетов для МА- топлива.

Страна	Радиус зоны, см	Мощность, ТВт	Загрузка тяжелых атомов, кг	Удельная загрузка топлива, Кг т.а./ТВт	Скорость трансмутации Тс, кг/ТВт сут
ЕСN, Нидерланды	97.0	1.56E-03	3370	2.16E+06	325
СЕА-Cadar. Франция	90.0	1.40E-03	3000	2.12E+06	350
ФЭИ, Россия	68.8	7.66E-04	1663	2.17E+06	363
ЕНЕА, Италия	97.5	1.58E-03	3423	2.17E+06	294
КТN, Швеция	92.4	1.41E-03	3065	2.17E+06	384
СИМАТ, Испания	94.5	1.48E-03	3208	2.17E+06	318
ИПМ, Россия (данная раб.)	82.5	1.116E-03	2419	2.167E+06	386

Наши расчетные характеристики бланкетов с разными видами ядерного топлива для сравнения собраны в таблице 12.



Таблица 12. Радиус активной зоны и загрузка нуклидов.

Топливо	TRU	МА
Радиус активной зоны, см	43,6	82,5
$K_{эфф}$ без внешнего источника	0,9603	0,9606
Мощность $P$ , Тв	2,843E-04	1,116E-03
Загрузка тяжелых атомов $G_{m.a}$ , кг т.а.	624	2419
Удельная загрузка $SFI$ , кг т.а./Тв	2,194E+06	2,167E+06
Загрузка $^{99}Tc$ $G_{Tc}$ (суммарная в зонах 5 и 6), кг	30726	50710

### 2.2.2 Расчеты начального состояния с внешним источником.

Задача с внешним источником решалась в диффузионном приближении. Модуль DIFRZ пакета REACTOR-S для такой задачи рассчитывает следующие величины:

- мощность blankets

$$P_{BL} = 2\pi \sum_{g=1}^G \sum_{i,j} (v_f \Sigma_f)^g \Phi^g(r_i, z_j) r_i \Delta r_i \Delta z_j,$$

- мощность заданного источника

$$P_S = 2\pi \sum_{g=1}^G \sum_{i,j} S^g(r_i, z_j) r_i \Delta r_i \Delta z_j,$$

- умножение в blankets

$$M_{BL} = \frac{P_{BL}}{P_S},$$

- распределение мощности blankets по радиусу  $Q(r)$ , нормированное на среднее значение  $\bar{P}_{BL} = 1$ .

Кроме того, в соответствии с требованиями теста, рассчитывалась величина относительной ценности нейтронов источника  $\phi^*$ , определенная в [5] в виде

$$\phi^* = \frac{\frac{1}{K_{эфф}} - 1}{\frac{1}{K_S} - 1},$$

где  $K_s$  – коэффициент мультипликации подкритического blankets с внешним источником, определяемый как

$$K_s = \frac{M_{BL}}{M_{BL} + 1}$$

Результаты расчетов для начального ядерно-физического состава топлива с внешним источником, имеющим различный спектр, представлены в таблице 13.

Таблица 13. Характеристики подкритических blankets с внешним источником различного спектра в начальном состоянии

Топливо	TRU				MA			
$R_c$ , см	43,6				82,5			
Номер спектра источника	1	2	3	4	1	2	3	4
$M_{BL}$	31,292	33,489	32,046	30,929	30,481	33,918	33,998	30,203
$K_s$	0,9690	0,9710	0,9697	0,9687	0,9682	0,9713	0,9714	0,9680
$\varphi^*$	1,294	1,384	1,325	1,278	1,250	1,390	1,395	1,238

Данные для сравнения результатов расчета интегральных характеристик собраны в таблицах 14 и 15.

Таблица 14. Зависимость коэффициента мультипликации и ценности от спектра нейтронов внешнего источника для TRU- топлива.

	Тип спектра	Коэффициент $K_s$	Ценность нейтронов источника, $\varphi^*$
ФЭИ, Россия	1	0.9680	1.26
	2	0.9697	1.33
	3	0.9687	1.29
	4	0.9673	1.23
ENC, Нидерланды	1	0.9719	1.46
	2	0.97920	1.98
	3	0.9698	1.36
	4	0.9690	1.28
ENEA, Италия	1	0.9677	1.25
	2	0.9703	1.37
	3	0.9687	1.29
	4	0.9674	1.24

КТН, Швеция	1	0.9633	1.35
	2	0.9637	1.94
	3	0.9640	1.30
	4	0.9640	1.24
СИМАТ, Испания	1	0.9663	1.18
	2	0.9774	1.77
	3	0.9650	1.15
	4	0.9620	1.05
ИПМ, Россия (данная работа)	1	0.9690	1.294
	2	0.9697	1.384
	3	0.9710	1.325
	4	0.9687	1.278

Таблица 15. Зависимость коэффициента мультипликации и ценности от спектра нейтронов внешнего источника для МА- топлива.

	Тип спектра	Коэффициент $K_s$	Ценность нейтронов источника, $\varphi^*$
ФЭИ, Россия	1	0.9670	1.23
	2	0.9705	1.38
	3	0.9704	1.37
	4	0.9665	1.21
ЕНЕА, Италия	1	0.9661	1.26
	2	0.9695	1.43
	3	0.9700	1.49
	4	0.9661	1.30
ИПМ, Россия (данная работа)	1	0.9682	1.250
	2	0.9713	1.391
	3	0.9714	1.395
	4	0.9680	1.238

Распределение мощности по радиусу blankets  $Q(r)$ , отнормированное на среднее значение  $\bar{P} = 1$ , для топлива TRU и МА при источнике с заданным спектром 1 показано на рис.1 и 2 соответственно (кривые - "без источника" соответствуют квазикритическому расчету). Расчеты показали, что распределение мощности по радиусу активной зоны практически не зависит от спектра внешнего источника.

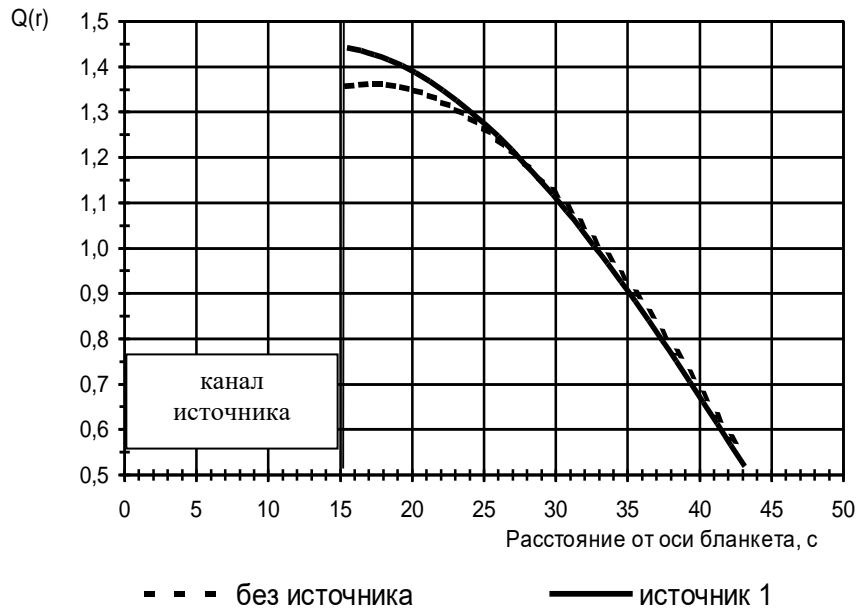


Рис.5. Распределение мощности по радиусу бланкета с TRU-топливом

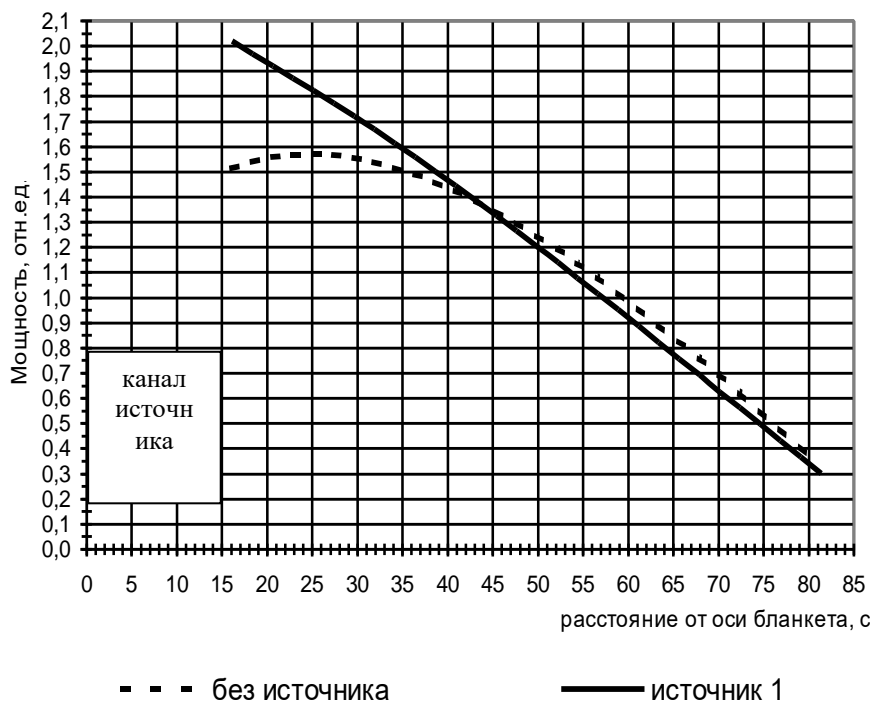


Рис.6. Распределение мощности по радиусу бланкета с МА-топливом

### 2.2.3. Расчеты выгорания в подкритическом бланкете с внешним источником.

В соответствии с требованиями теста рассчитаны величины, характеризующие процесс выгорания при работе бланкета на мощности, определенной в разделе 2.1, в течение 100 суток. Расчет проводился шагами

по 20 суток, как это предписано условиями теста. Расчеты выполнены для всех 4-х типов спектра внешнего источника.

Определены следующие характеристики:

- изменение величины коэффициента мультипликации  $K_s$  в процессе выгорания;
- полное изменение  $\Delta K_s$  за 100 суток выгорания;
- удельная скорость выжигания тяжелых атомов  $R_{m.a.}$  кг/Тв\*сут., определенная как

$$R_{ac} = \frac{\Delta G_{m.a.}(100)}{P_{BL}},$$

где  $\Delta G_{m.a.}(100)$  – изменение загрузки тяжелых атомов за 100 суток выгорания;

- удельная скорость трансмутации  $^{99}\text{Tc}$   $R_{Tc}$  кг/Тв\*сут., определенная как

$$R_{Tc} = \frac{\Delta G_{Tc}(100)}{P_{BL}},$$

где  $\Delta G_{Tc}(100)$  – изменение количества  $^{99}\text{Tc}$  за 100 суток выгорания;

- время трансмутации полного количества нуклидов, загруженных в бланкет  $T_t$ , определенное как

$$T_t = \frac{G_{m.a.}(Tc)}{R_{m.a.}(Tc)}$$

Результаты расчетов этих характеристик представлены в таблице 16.

Таблица 16. Характеристики подкритических бланкетов с внешним источником различного спектра в процессе выгорания.

Топливо	TRU				МА			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Номер спектра источника								
$K_s(t=0)$	0,9690	0,9710	0,9697	0,9687	0,9682	0,9713	0,9714	0,9680
$K_s(t=20 \text{ сут.})$	0,9629	0,9645	0,9638	0,9619	0,9653	0,9689	0,9688	0,9650
$K_s(t=40 \text{ сут.})$	0,9568	0,9588	0,9573	0,9550	0,9624	0,9663	0,9661	0,9621
$K_s(t=60 \text{ сут.})$	0,9506	0,9525	0,9507	0,9481	0,9595	0,9636	0,9634	0,9591
$K_s(t=80 \text{ сут.})$	0,9443	0,9461	0,9441	0,9411	0,9565	0,9609	0,9606	0,9562
$K_s(t=100 \text{ сут.})$	0,9380	0,9396	0,9374	0,9340	0,9537	0,9583	0,9580	0,9532
$\Delta K_s(100 \text{ сут.})$	0,0310	0,0314	0,0323	0,0347	0,0145	0,0131	0,0134	0,0148
$R_{ac}$ кг/Тв*сут.	1000 (1030)				1000 (1030)			
$T_{t,ac}$ , лет	~ 6,0 (5,6)				~ 5,95 (5,6)			
$R_{Tc}$ кг/Тв*сут.	644 (630)				386 (325)			
$T_{t,Tc}$ , лет	~ 460 (600)				~ 322 (360)			

В последних 4-х строках таблицы 16, содержащих данные по скорости и времени трансмутации, в скобках приведены взятые из работы [5] значения соответствующих характеристик, усредненных по результатам расчетов, выполненных в других организациях.

На рис.6, 7 показано изменение  $K_s$  в процессе выгорания для TRU и МА - топлива соответственно.

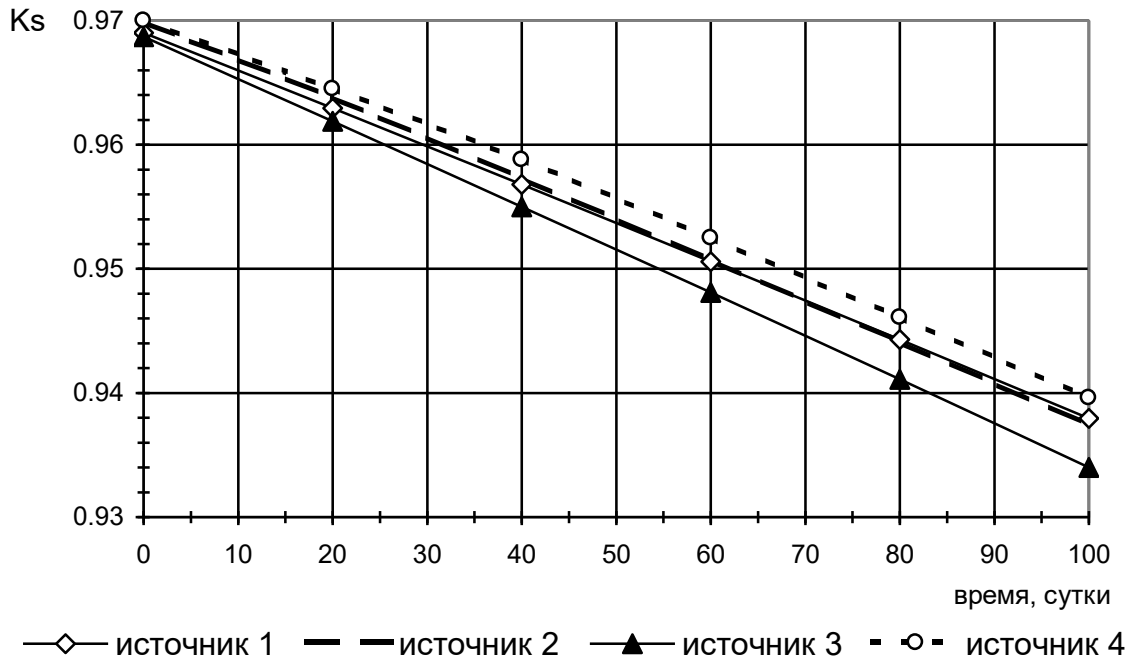


Рис.6. Изменение  $K_s$  blankets с TRU-топливом в процессе выгорания

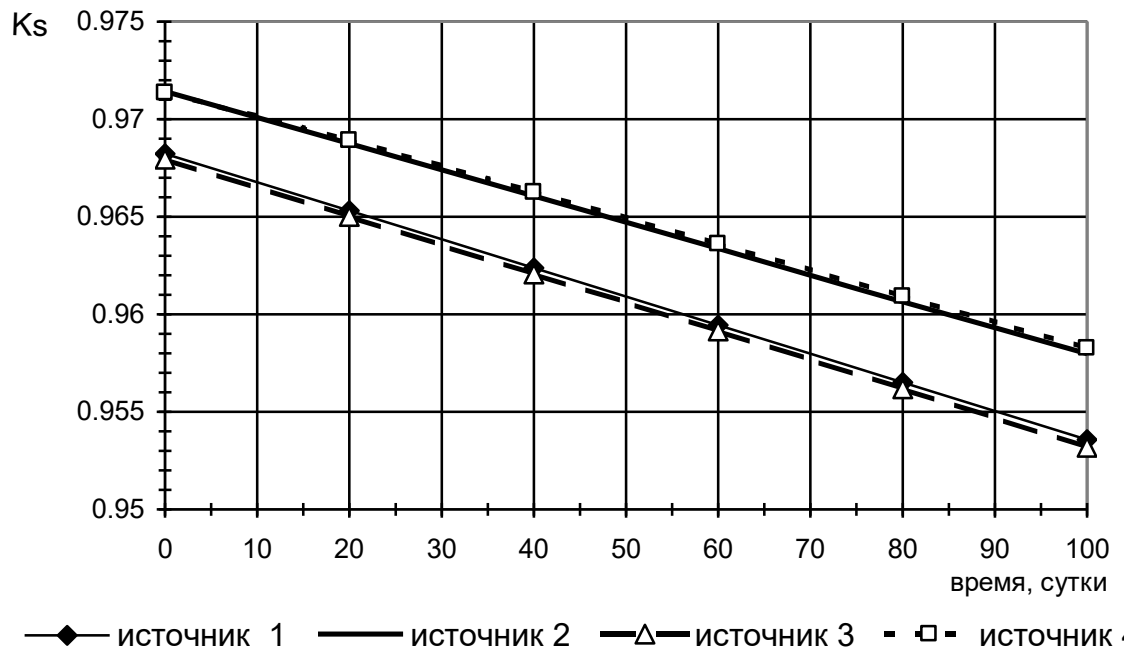


Рис. 7 Изменение  $K_s$  blankets с МА-топливом в процессе выгорания

## Заключение

В работе представлены результаты расчета по созданному в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН программному комплексу REACTOR-S теста МАГАТЭ по расчету гибридных ядерных систем (ускоритель-мишень-бланкет) IAEA-ADS Benchmark.

В рамках этого теста, состоящего из двух частей, были проведены обширные расчеты двух моделей гибридных систем с различным ядерным топливом в бланкете и различными спектрами нейтронов внешнего источника, имитирующего источник нейтронов, возникающий в мишени под действием пучка протонов. В частности, для уран-ториевого топлива определено обогащение по  $^{233}\text{U}$ , рассчитано изменение Кэфф, мощности бланкета, мощности внешнего источника нейтронов по кампании, эффект отравления протактинием. Для топлива с повышенным содержанием трансурановых элементов (TRU-топливо) и топлива с повышенным содержанием младших актинидов (МА-топливо) рассчитаны необходимые размеры бланкетов, их мощности, загрузка топлива, скорость трансмутации технеция. Найдена зависимость таких интегральных характеристик, как коэффициент мультипликации  $K_s$  и ценности нейтронов внешнего источника от типа спектра этих нейтронов, определены скорости выжигания топлива, время полной трансмутации топливных нуклидов, загружаемых в бланкет и др.

Сравнение с результатами расчета, полученными в других научных организациях, показывает, что созданный в ИПМ им. М.В. Келдыша программный комплекс REACTOR-S, позволяет получать результаты по расчету гибридных ядерных систем, не уступающие по полноте и точности зарубежным и отечественным программам.

## Литература

1. C. Rubbia et al. Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier, CERN/AT/95-44 (ET), 1995
2. M. Salvatores, M. Spiro, I. Slessarev et al. Role of Accelerator Driven System in High Level Wastes Incineration. Proc. GLOBAL-97 Int. Conf., Japan, Oct. 5-10, 1997
3. T. Takizuka, K. Tsuchimoto, T. Sana and H. Takano. Heavy Liquid-Metal Cooling Option of JAERI Accelerator-Driven Transmutation System. Сб. докладов конференции “Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях”, Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 1999

4. IAEA. TCM on Feasibility and Motivation for Hybrid Concept for Nuclear Energy Generation and Transmutation, Madrid, Spain, 17-19 September 1997. ADS-Neutronic Benchmark (1 Stage)
5. Slessarev, V. Arkhipov. Study of a Neutronic Potential of a Modular Fast Spectrum ADS for Radiotoxic Waste Transmutation. Proc. of ADTTA'99, Mo-O-F2, Praha, June 7 – 11, 1999.
6. Л.П.Абагян, Н.О.Базазянц, М.Н.Николаев, А.М.Цибуля. Групповые константы для расчета реакторов и защиты. Энергоиздат, М., 1981.
7. Г.Н. Мантуров, М.Н. Николаев, А.М. Цибуля. Система групповых констант БНАБ-93. Часть 1: нейтронные и фотонные ядерные константы. Вопросы атомной науки и техники, сер. Ядерные константы, вып.1, 1996.