

ГИБРИДНАЯ РЕАКТОРНАЯ УСТАНОВКА С Th-Pu-U ОКСИДНЫМ ТОПЛИВОМ И ПЛАЗМЕННЫМ ИСТОЧНИКОМ НЕЙТРОНОВ

А.В. Аржанников 1, С.В. Беденко 2, А.А. Иванов 1, Д.Г. Модестов 3, В.В. Приходько 1, С.Л. Синицкий 1, И.В. Шаманин 2, В.М. Шмаков 3, а, Е.В. Серова 3, Н.В. Степанов 3, А.М. Титова 3

1 Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, СО РАН

2 Национальный исследовательский Томский политехнический университет

3 Российский федеральный ядерный центр – ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина a) v.m.shmakov@vniitf.ru



ФГУП Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Технической Физики имени академика Е.И.Забабахина, Снежинск, Россия

В работе исследуются особенности пространственной кинетики гибридной ториевой реакторной







Schematic of facility for studying the evolution of thorium-plutonium fuel composition

Тип соленоида	Nº 1	Nº 2	Nº 3
DD-источник	82.2	85.1	82.4
DT-источник	92.1	102.5	92.6



Расчеты потоков, мощности, выгорания



Постановка задачи



Геометрия расчетной модели соленоида

Комплекс программ ПРИЗМА+РИСК



Schema to realize the process of simulations of fuel evolution Схема работы программ комплекса РИСК+ПРИЗМА

В расчетах Кэфф, нейтронных потоков, числа делений и мощности энерговыделения использовались программы Монте-Карло ПРИЗМА-Д и ПРИЗМА[3, 4] с нейтронными константами из библиотеки ENDF/B-VII.1 [12, 13, 14]. В расчетах эволюции состава топлива использовалась программа РИСК [5–11] с ядерными данными DECAY из библиотеки ENDF/B-VII.0 [12]. В расчетах выгорания по комплексу РИСК+ПРИЗМА прослеживалось изменение концентраций около 1700 материалов.

В начале каждого шага по времени использовалась заранее подготовленная



Состав топлива

Для исследований были выбраны системы с 4% и 5% содержанием плутония в металле Pu (α) Th (1- α), для которых Кэфф = 0.9480 и Кэфф = 0.9894, соответственно. Расчеты проводились для "холодной" сборки с константами для чистого углерода, т.е. без учета химической связи в графите.

> Ядерная концентрация гомогенизированной смеси металлов Ри (α) Th (1- α) в матрице топливной таблетки (1/br*cm)

α	Pu(239)	Pu(240))	Pu(241)	Th(232)	Кэфф	б%
0.5	2.4943e-4	1.327e-5	2.65e-6	2.6535e-4	1.125	0.004
0.06	0.2991e-4	0.159e-5	0.33e-6	4.9886e-4	1.018	0.01
0.05	0.2493e-4	0.133e-5	0.26e-6	5.0416e-4	0.989	0.01
0.04	0.1994e-4	0.106e-5	0.21e-6	5.0947e-4	0.948	0.01
0.03	0.1496e-4	0.079e-5	0.16e-6	5.1478e-4	0.884	0.02
0.02	0.0977e-4	0.053e-5	0.11e-6	5.2009e-4	0.777	0.03

Состав гомогенизированного покрытия микроТВЭЛа в матрице топливной таблетки (1/br*cm)

Ti	Si	С	0
1.3829e-3	4.6098e-4	7.7379e-2	1.0614e-003

информация о начальных данных (IND): данные о геометрии, данные о веществах (ZA), данные о параметрах источника, данные по температурам областей системы, данные о заказанных результатах, данные об обработке результатов, данные о шагах по времени **Δt и другие данные.** На каждом шаге **Δt наряду с выгоранием рассчитались Кэфф**, тепловая мощность установки и различные функционалы потока нейтронов.





operation time

Effective multiplicity coefficient *k*ef vs. operation time.



0.9

0.96

0.94

0.92

0.88

0.86

0.84

0.82

0.8

10

e f 0.9



- Keff

10³

Keff-2σ

Keff+2σ

Мощность P, MVt



Effective multiplicity coefficient *k*ef vs. operation time.

t, day

10'

10²

The power of the subcritical assembly P vs. operation time

энергии плотности нейтронов



Рисунок 46 – Распределение по энергии потока нейтронов

Выбор доли Pu в смеси Pu (α) Th (1- α)



Зависимости Кэфф от доли плутония α в металле

1-слой

2-слой

3-слой

4-слой

10



2

Расчеты выгорания



Рассчитаны варианты топлива АЗ с Кэфф=0.95 при облучении DD- и DT-нейтронами

Прослеживалось изменение состава более 1400 изотопав						
U[235]	 1415 Bk[247]					
Mg[24]	1416 Am[246]					
Be[9]	1417 Cm[251]					

J	wgz4j	1410	Λιτι[Ζ+0]
4	Be[9]	1417	Cm[251]
5	C[12]	1418	Pu[246]
6	O[16]	1419	CI[36]
7	U[236]	1420	CI[34]
8	He[4]	1421	P[34]
9	Th[231]	1422	Cf[250]
0	U[234]	1423	Cf[248]
1	U[233]	1424	Cf[247]
2	U[232]	1425	Rb[79]
3	Cr[66]	1426	Bk[251]
		1427	Pu[247]

Эволюция топлива за 60-дневный период (для K=0.95, DT, q=45e16)

day	U-232	U-233	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Th-232
0	0.0	0.0	1.9940e+19	1.0610e+18	2.1230e+17	5.0947e+20
1	8.4488e+08	3.9241e+14	1.9757e+19	1.1210e+18	2.2109e+17	5.0944e+20
2	8.4048e+09	1.4654e+15	1.9633e+19	1.1612e+18	2.2740e+17	5.0942e+20
3	3.0434e+10	3.0556e+15	1.9515e+19	1.1993e+18	2.3364e+17	5.0939e+20
4	7.3686e+10	5.1288e+15	1.9401e+19	1.2357e+18	2.3988e+17	5.0937e+20
5	1.4221e+11	7.6531e+15	1.9292e+19	1.2704e+18	2.4604e+17	5.0935e+20
10	8.9991e+11	2.6111e+16	1.8793e+19	1.4267e+18	2.7643e+17	5.0926e+20

Изменение концентраций во времени

Результаты с DD-источником.





Результаты с DD-источником.

30	9.8876e+12	1.6424e+17	1.7160e+19	1.9080e+18	4.0031e+17	5.0896e+20
60	3.4774e+13	4.4311e+17	1.5375e+19	2.3802e+18	5.7456e+17	5.0861e+20

Эволюция топлива за 60-дневный период (для K=0.95, DD, q=2e16)

day	U-232	U-233	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Th-232
0	0.0	0.0	1.9940e+19	1.0610e+18	2.1230e+17	5.0947e+20
1	6.8291e+05	1.4428e+13	1.9933e+19	1.0632e+18	2.1259e+17	5.0947e+20
2	8.9254e+06	5.9015e+13	1.9926e+19	1.0655e+18	2.1289e+17	5.0947e+20
3	3.6532e+07	1.3316e+14	1.9919e+19	1.0678e+18	2.1317e+17	5.0947e+20
4	9.4382e+07	2.3557e+14	1.9913e+19	1.0700e+18	2.1347e+17	5.0947e+20
5	1.9064e+08	3.6534e+14	1.9906e+19	1.0722e+18	2.1375e+17	5.0946e+20
10	1.3755e+09	1.3919e+15	1.9873e+19	1.0830e+18	2.1516e+17	5.0946e+20
30	1.8991e+10	1.0481e+16	1.9744e+19	1.1252e+18	2.2085e+17	5.0944e+20
60	7.5494e+10	3.1977e+16	1.9572e+19	1.1811e+18	2.2877e+17	5.0941e+20



200

400

t, сут

600

U-233 Pu-239 Pu-240 Pu-241

800

1000

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования проведены по договору № 6.020/4012 по комплексу программ РИСК+ПРИЗМА, разработанных в ФГУП "РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина", выполнены компьютерные расчеты по определению нейтронно-физических характеристик ториево-плутониевой тепловыделяющей сборки в условиях ее подпитки термоядерными нейтронами из горячей плазмы, удерживаемой в длинной магнитной ловушке.

В расчетах по программе ПРИЗМА (метод Монте–Карло) получены:

 – эффективные коэффициенты размножения нейтронов Кэфф для различных конфигураций АЗ (6 конфигураций) и различного состава топлива, как для комнатной температуры всей сборки, так и для её разогретых частей (топлива и теплоносителя в топливных блоках, замедлителей в боковом и торцевом отражателях), оценены температурные эффекты критичности;

- коэффициенты умножения нейтронов от источников DD- и DT-нейтронов от плазмы для различных конфигураций соленоида со слоями дополнительного размножителя из 238U, Be и PuO2.

В расчетах по комплексу РИСК+ПРИЗМА получены:

- результаты изменения концентраций при выгорании топлива во всей сборке и её частях при заданных режимах работы плазменного источника DD- и DT-нейтронов на период до 3000 суток;

- оценки пространственного распределения в активной зоне установки нейтронных потоков, числа делений, энерговыделения и изменения концентраций основных делящихся материалов 232Th, 232U, 233U, 239Pu, 240Pu, 241Pu и 242Pu при выгорании топлива на период кампании до 3000 суток.

Для холодных сборок средняя разница от использования констант графита и углерода составляет около 1%. Для горячих сборок средняя разница от использования констант графита и углерода еще меньше и составляет около 0.2%. Поэтому основные расчетные исследования были проведены без учета химической связи, то есть с чистым углеродом.

Средний температурный эффект реактивности как по углероду, так и по графиту для сборок оказался отрицательным и составил около -7% в Кэфф. Однако, для сокращения времени счета было принято решение проводить дальнейшие исследования с "холодными" сборками при доведении их до подкритичности Кэфф ~ 0.95 – 0.99 за счет уменьшения концентрации Pu до 4-5% в смеси Pu(α)Th(1- α).

Расчёты выгорания проведены для геометрии стенда № 6 с двумя вариантами концентрации плутония в топливе и, следовательно, Кэфф. Для первого варианта топлива был выбран Pu0.04Th0.96 с начальным Кэфф=0,9480. Для второго варианта – Pu0.05Th0.95 с начальным Кэфф=0,9894. Подкритичность, как уже было отмечено выше, можно обеспечить и другими способами. Например, введением в сборку поглощающих стержней или нанесением дополнительного покрытия из выгорающего поглотителя ZrB2 на топливные таблетки и др. Далее, каждый из этих двух вариантов топлива был просчитан с источником DD– и DT–нейтронов. В объеме плазмы задавался равномерный источник DD–нейтронов мощности 2e16 н/с. Такой же объемный источник DT–нейтронов имел мощность 4.5 e17 н/с. Время непрерывной работы источников составило около 3000 суток. Результаты по изменению концентраций топлива, тепловой мощности установки, Кэфф, нейтронных потоков, числа делений и других функционалов нейтронного потока выдавались в различных слоях сборки через каждые 30 дней. Для детализации поведения этих же характеристик в начальный 100–дневный период результаты рассчитывались с шагом 1 день.

Сравнительные расчеты с одним из источником DD- или DT-нейтронов, но с разной мощностью показали существенное различие в поведении Кэфф и тепловой мощности установки. Так, при одной и той же мощности (2e16 н/с или 4.5e17 н/с) источников DD- и DT-нейтронов поведение Кэфф и энерговыделения близки друг другу. То есть разбавление тритием дейтериевой плазмы позволит управлять мощностью источника и, следовательно, энерговыделением в топливной части установки, что выглядит более приемлемым, чем искать выход в конструкционных изменениях активной зоны.

В расчетах Кэфф, нейтронных потоков, числа делений и мощности энерговыделения использовались программы Монте-Карло ПРИЗМА-Д и ПРИЗМА с нейтронными константами из библиотеки ENDF/B-VII.1. В расчетах эволюции состава топлива использовалась программа РИСК с ядерными данными DECAY из библиотеки ENDF/B-VII.0 В расчетах выгорания по комплексу РИСК+ПРИЗМА прослеживалась эволюция около 1700 изотопов.

Можно считать, что полученные результаты подтвердили возможность программ РФЯЦ-ВНИИТФ обеспечить расчеты эволюции топлива и нейтронно-физических характеристик установки в различных режимах работы плазменного источника термоядерных нейтронов.

Программа ПРИЗМА аттестована в Ростехнадзоре для расчета критичности (аттестационный паспорт №406 от 08.12.2016), для расчета прохождения проходит аттестацию в настоящее время.