



ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯЭУ ТИПА ВВЭР-1200С ТОПЛИВНОЙ ЗАГРУЗКИ МОХ-ТОПЛИВОМ (ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПЛУТОНИЙ И РЕГЕНЕРИРОВАННЫЙ УРАН) И ТОПЛИВОМ ИЗ РЕГЕНЕРИРОВАННОГО УРАНА»

*Студент: Бекчанов Саиджон Ешанбай угли, Пардабаев Шахзод
Шухрат угли*

*Научный руководитель: Щербаков Александр Антонович, главный
эксперт отдела радиационной безопасности и аварийного реагирования
отделения РБ, РАО и ОЯТ, вывода из Эксплуатации АО «ВНИИАЭС»*

*Филиал Национального Исследовательского Ядерного Университета
«МИФИ» в г. Ташкенте*

Введение. Сокращение объёмов радиоактивных отходов и переработка отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) остаются ключевыми задачами ядерной энергетики. Вместо одноразового использования топлива значительную его часть можно переработать и вернуть в цикл, то есть замкнуть топливный цикл. Для тепловых реакторов рассматриваются два основных вида топлива.

МОКС-топливо ($\text{UO}_2 + \text{PuO}_2$) получают смешением плутония, выделенного из ОЯТ, с обеднённым или регенерированным ураном. Массовая доля плутония в нём составляет 8–10 %.

РЕМИКС-топливо изготавливают из неразделённой смеси урана и плутония, выделенных при переработке, с добавлением обогащённого урана (около 16–17 % ^{235}U). Доля плутония в нём не превышает 3,5 %, поэтому возможна полная загрузка активной зоны ВВЭР.



Использование таких топлив связано с рядом ограничений. При повторном использовании урана накапливается ^{232}U , являющийся источником мощных гамма-излучателей, и ^{236}U , поглощающий нейтроны. Рециклирование плутония ухудшает его изотопный состав, то есть увеличивает долю чётных изотопов, и повышает наработку младших актинидов (нептуния, америция, кюрия). По данным литературы, стоимость изготовления МОКС-ТВС на основе высокофонового плутония как минимум в пять раз выше, чем урановых. Исследования МОКС и РЕМИКС проводились в основном для реакторов ВВЭР-1000, и для ВВЭР-1200 данных существенно меньше.

Цель и задачи. Цель работы — проектирование загрузки активной зоны ВВЭР-1200 с МОКС и РЕМИКС в сравнении с топливом из обогащённого урана (UO_2). Для достижения цели решались четыре задачи:

1. определение теплофизических параметров реакторной установки;
2. создание модели активной зоны в расчётном коде OpenMC;
3. нейтронно-физические расчёты для поиска параметров загрузки;
4. определение характеристик выгорания и состава ОЯТ.

Объект исследования. ВВЭР-1200 — корпусной водо-водяной реактор на тепловых нейтронах с четырьмя горизонтальными парогенераторами. Для превращения энергии используется турбоустановка К-1200-6,8/50. Параметры первого контура: давление 16,2 МПа, температура на входе в активную зону 298,2 °С, на выходе 328,6 °С. Активная зона высотой 3,73 м содержит 163 бесчехловые ТВС по 312 твэлов, расположенных по треугольной решётке с шагом 12,75 мм, и 18 направляющих каналов. Диаметр твэла 9,1 мм, толщина циркониевой



оболочки 0,65 мм, диаметр топливной таблетки 7,6 мм, центральное отверстие 1,2 мм.

Методика расчёта. Теплофизический расчёт. КПД цикла насыщенного пара с промежуточной сепарацией и перегревом (семь регенеративных отборов) рассчитан по свойствам воды и пара, полученным в программе WaterSteamPro. Тепловая мощность определена по КПД брутто и электрической мощности блока 1200 МВт, расходы первого и второго контуров найдены из тепловых балансов. Распределение температур по высоте активной зоны получено для наиболее напряжённого твэла при косинусном профиле энерговыделения (эффективная высота 3,91 м, коэффициенты неравномерности $K_r = 1,4$ и $K_z = 1,5$). Температура теплоносителя, наружной и внутренней поверхностей оболочки и топлива рассчитана последовательно с учётом термических сопротивлений оболочки, газового зазора и топливной таблетки. Коэффициент теплоотдачи найден усреднением по трём корреляциям для продольно обтекаемых пучков в треугольной решётке. Запас до кризиса теплообмена определён по формуле Безрукова, потери давления и мощность на прокачку — по сумме потерь на трение, ускорение, нивелирный напор и местные сопротивления.

Нейтронно-физический расчёт. Расчёты методом Монте-Карло выполнены в коде OpenMC. Построены модели бесконечной шестигранной ячейки с полным отражением на границах, ТВС и активной зоны для трёх топлив (UO_2 , МОКС, РЕМИКС). Средние температуры: топливо 1150 К, оболочка 600 К, теплоноситель 590 К, плотность воды 0,7 г/см³. Температурный коэффициент реактивности $\alpha_T = (k_1 - k_2)/(T_1 - T_2)$ и коэффициент по плотности теплоносителя α_ρ найдены по двум расчётам. Для первого температура топлива варьировалась от 1150 до 900



К, для второго плотность воды от 0,7 до 0,6 г/см³. Выгорание определено расчётом изменения k_{∞} во времени. Схема перегрузок выбиралась из условия, что среднее значение k_{∞} по партиям равно единице, а выгорание рассчитывалось по формуле $PT = W_{\text{т}} \cdot T / \rho_{\text{т}}$. Дополнительно получены спектры нейтронов, доля запаздывающих нейтронов и изотопный вектор плутония в выгружаемом топливе.

Результаты и обсуждение.

Теплофизические характеристики. Результаты расчёта приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные результаты теплофизического расчёта

Температура наружной поверхности оболочки на наиболее напряжённом твэле на участке 0,43–1,43 м превышает температуру насыщения менее чем на 3 °С. Это соответствует режиму поверхностного кипения, при котором теплоотдача улучшается. Температура топлива существенно ниже температуры плавления UO_2 , запас до кризиса теплообмена более чем вдвое превышает требуемый. Таким образом, тепловые параметры реактора не накладывают ограничений на использование рассматриваемых топлив.

Коэффициенты реактивности. Результаты расчёта приведены в таблице 2.

Таблица 2. Коэффициенты реактивности



Параметр	Значение
КПД брутто, %	36,4
Тепловая мощность, МВт	3298
Расход теплоносителя первого контура, кг/с	18104
Расход второго контура, кг/с	1830
Макс. температура теплоносителя, °С	340,8
Макс. температура наружной поверхности оболочки, °С	350,7 ($T_{\text{нас}} = 348,4$)
Макс. температура внутренней поверхности оболочки, °С	384,9
Макс. температура топлива, °С	1689 ($T_{\text{пл}} = 2800$)
Запас до кризиса теплообмена	2,9 (требуется $\geq 1,2-1,3$)
Потери давления в активной зоне, МПа	0,237
Мощность на прокачку, МВт	7,26 (0,6 % от $N_{\text{эл}}$)

Для всех топлив температурный коэффициент по топливу отрицателен, что обеспечивает устойчивость реактора. Положительные значения α_r означают падение реактивности при уменьшении плотности теплоносителя, то есть отрицательную обратную связь по плотности. Наибольшая по модулю температурная обратная связь получена для МОКС-загрузки.

Выгорание. Для трёх топлив определены зависимости k_{∞} от времени и найдены глубины выгорания при трёх-, четырёх- и пятикратной перегрузке (таблица 3).

Топливо	3 партии	4 партии	5 партий
UO ₂	57,7 (3×550 сут)	62,9 (4×450 сут)	65,6 (5×375 сут)
МОКС	44,6 (3×425 сут)	50,0 (4×350 сут)	52,1 (5×300 сут)
РЕМИКС	49,4 (3×475 сут)	55,4 (4×400 сут)	60,6 (5×350 сут)

Таблица 3. Выгорание топлива, МВт·сут/кг [согласовать строку РЕМИКС с табл. 10 ВКР: там 3×600 сут, 62,3 МВт·сут/кг, обогащение 3,7 %]



При трёхкратной перегрузке длительность работы составила 1650 эффективных суток для UO_2 , 1275 для МОКС и 1800 для РЕМИКС. Доля запаздывающих нейтронов в модели с UO_2 -топливом составила 0,7 %. Спектры нейтронов для всех трёх загрузок имеют выраженный максимум в тепловой области.

Плутониевый вектор в выгружаемом топливе. Результаты приведены в таблице 4.

Изотоп	МОКС	UO_2	РЕМИКС
^{238}Pu	0,88	2,80	0,69
^{239}Pu	45,66	55,27	60,81
^{240}Pu	27,98	21,73	23,26
^{241}Pu	17,14	14,63	13,01
^{242}Pu	3,32	5,55	2,21

Таблица 4. Изотопный состав плутония в выгружаемом топливе, %

Выгружаемый из МОКС плутоний наиболее обеднён по ^{239}Pu и обогащён чётными изотопами (^{240}Pu и ^{242}Pu), что затрудняет его повторное использование. В РЕМИКС доля ^{239}Pu наибольшая (60,8 %), а ^{242}Pu наименьшая (2,2 %), то есть вектор плутония оказывается наиболее благоприятным для многократного рецикла.

Обсуждение. РЕМИКС при обогащении 3,7 % обеспечивает кампанию, сопоставимую с UO_2 при обогащении 5,2 % и превосходящую МОКС, то есть позволяет заметно уменьшить долю свежего ^{235}U . Следует учитывать, что загрузки сравнивались при разных начальных запасах реактивности (k_{∞} в начале кампании около 1,40 для UO_2 , 1,28 для МОКС и 1,35 для РЕМИКС), поэтому различия в длительности кампаний



отражают не только свойства самих топлив. Расчёты выполнены для бесконечной ячейки без учёта утечки нейтронов и неоднородности энерговыделения по активной зоне, поэтому результаты следует рассматривать как предварительные оценки. Для окончательных выводов необходимы расчёты полной активной зоны и сравнение при одинаковом запасе реактивности.

Выводы.

1. Теплофизические параметры ВВЭР-1200 удовлетворяют проектным ограничениям: тепловая мощность 3298 МВт, КПД брутто 36,4 %, максимальная температура топлива 1689 °С, запас до кризиса теплообмена 2,9.
2. Температурные коэффициенты реактивности по топливу отрицательны для UO_2 , МОКС и РЕМИКС, а коэффициенты по плотности теплоносителя указывают на отрицательную обратную связь.
3. При трёхкратной перегрузке длительность кампании составила 1650 суток для UO_2 , 1275 для МОКС и 1800 для РЕМИКС. РЕМИКС при меньшем обогащении обеспечивает кампанию, сопоставимую с урановым топливом.
4. Плутоний, выгружаемый из РЕМИКС, содержит наибольшую долю ^{239}Pu и наименьшую ^{242}Pu , то есть наиболее пригоден для повторного рецикла.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Фёдоров Ю.С., Бибичев Б.А., Зильберман Б.Я., Кудрявцев Е.Г. Использование регенерированного урана и плутония в тепловых реакторах // Атомная энергия. 2005. Т. 99, вып. 2. С. 136–141.
2. Павловичев А.М., Павлов В.И., Семченков Ю.М. и др. Нейтронно-физические характеристики активной зоны ВВЭР-1000 со



100%-ной загрузкой топливом из регенерированного урана и плутония // Атомная энергия. 2006. Т. 101, вып. 6. С. 407–413.

3. Декусар В.М., Каграманян В.С., Калашников А.Г. и др. Анализ характеристик РЕМИКС-топлива при многократном рецикле в реакторах ВВЭР // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2013. № 4.
4. Physics of Plutonium Recycling. Vol. VI. Multiple Pu Recycling in Advanced PWRs. NEA OECD, 2002.
5. Hossain Md I. et al. Neutronic calculations for the VVER-1000 MOX core computational benchmark using the OpenMC code.
6. Ozoani J., Volkov Y. Enhancing the efficiency of the MOX fuel cycle for VVER-1200 using burnable absorbers.
7. Дементьев Б.А. Ядерные энергетические установки. 1990.