

УДК 621.039.5.022

ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ОБЛИК ЖИДКОСОЛЕВОГО РЕАКТОРА-СЖИГАТЕЛЯ Np, Am, Cm ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА ВВЭР

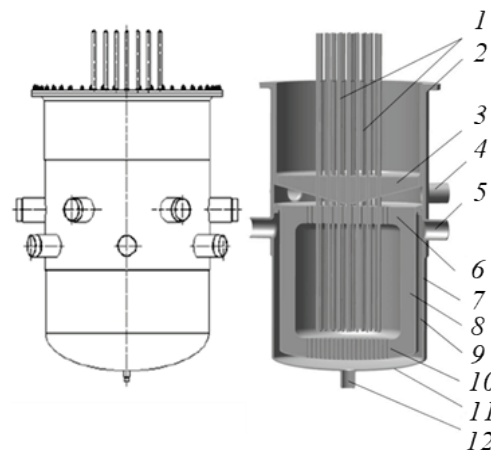
Лопаткин А.В., Третьяков И.Т., Ларионов И.А., Туктаров М.А., Зайко И.В., Клименко Д.С.

(АО «НИКИЭТ», г. Москва)

e-mail: lopatkin@nikiet.ru

Экологически безопасное развитие ядерной энергетики тесно связано с решением задачи утилизации отработавшего ядерного топлива, в составе которого содержатся долгоживущие изотопы Np, Am, Cm. Одним из способов решения этой задачи является их трансмутация в менее радиотоксичные изотопы в жидкосолевых реакторах (ЖСР). В АО «НИКИЭТ» проработаны конструктивная схема и основные физические характеристики жидкосолевого реактора-сжигателя Np, Am, Cm. В качестве топлива реактора предлагается использовать жидкосолевою композицию в виде расплава фторидов лития и бериллия 73% LiF—27% BeF₂ и растворенных в нем фторидов актиноидов AnF₃₍₄₎. Следует отметить, что в расплаве солей фторидов лития и бериллия растворимость актиноидов, содержащихся в виде тетрафторидов NpF₄, UF₄, намного выше, чем трифторидов PuF₃, AmF₃, CmF₃, что скажется на результатах расчетов [1]. Для концептуальной разработки ЖСР-сжигателя Np, Am, Cm в качестве исходных требований выбрана его производительность 250 кг в течение эффективного года при тепловой мощности 2400 МВт.

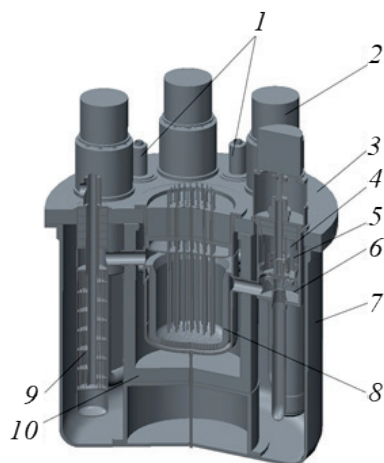
Активная зона ЖСР выполняется в виде заполненной топливной композицией цилиндрической полости, которая сбоку окружена отражателем (рис. 1). Топливо протекает через активную зону снизу вверх. Кольцевая полость, образуемая боковым отражателем и корпусом, формирует опускной тракт течения относительно холодной топливной соли температурой 620 °С. Полость между верхним отражателем и крышкой корпуса перенаправляет топливную соль, выходящую из активной зоны, во внешний контур циркуляции. Такая схема течения позволяет улучшить температурные условия боковой части корпуса и днища реактора. Принята трехконтурная схема теплоотвода из активной зоны. Первый контур топливный, второй — с теплоносителем на основе расплавленной соли состава 66% LiF—34% BeF₂, третий — пароводяной с турбиной.



Р и с. 1. Модель ЖСР: 1 — приводы РО СУЗ; 2 — опорный фланец; 3 — крышка корпуса; 4, 5 — входной и выходной патрубков соответственно; 6, 8, 10 — верхний, боковой и нижний отражатель соответственно; 7 — корпус реактора; 9 — опускной тракт; 11 — днище; 12 — патрубок дренажа

Удельное объемное энерговыделение топлива ЖСР является важным фактором, определяющим его многие ключевые характеристики, включая тепловую мощность и массогабаритные параметры. Увеличение объемного энерговыделения приводит к повышению скорости сжигания актиноидов и снижению массогабаритных параметров реактора, но при этом возрастают радиационные нагрузки на корпус. Не менее важным параметром является подогрев топливной соли в активной зоне. Подогрев определяет ее необходимый расход, а также параметры циркуляционных насосов и теплообменников. Температура топливной соли на входе в активную зону составляет 620 °С, на выходе — 700 °С, подогрев — 80 °С.

Петлевая и интегральная компоновочные схемы топливного контура реакторной установки проанализированы с учетом требований минимизации объема топливной соли в первом контуре. В результате выбрана блочно-петлевая компоновка ЖСР, согласно которой реактор, элементы оборудования и трубопроводов первого контура циркуляции размещены в компактном объеме — защитном корпусе, что обеспечивает минимально возможное количество



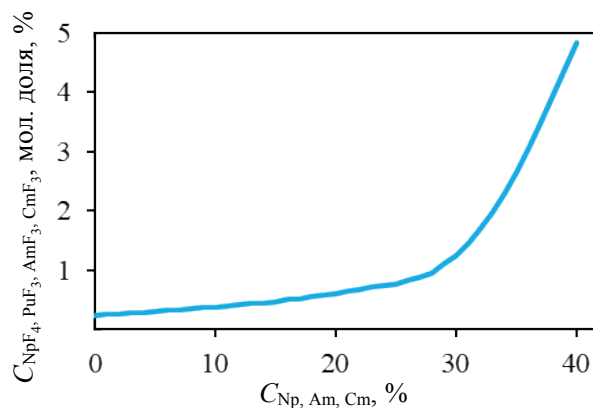
Р и с. 2. Модель реакторной установки с ЖСР: 1 — патрубки подвода/отвода охлаждающей соли промежуточного контура; 2 — приводы ГЦН; 3 — несущая плита; 4 — гелиевая полость; 5 — уровень топливной соли; 6 — ГЦН; 7 — защитный корпус; 8 — реактор; 9 — промежуточный теплообменник; 10 — биологическая защита

топлива вне активной зоны (рис. 2). Размещение реактора, теплообменников и насосов контура на несущей плите позволит дистанционно заменять их выемные части.

Технические характеристики концептуально разработанной реакторной установки с ЖСР следующие:

Мощность, МВт:	
тепловая . . .	2400
электрическая . . .	1000
Коэффициент использования установленной мощности, % . . .	82,1
К.п.д. преобразования тепловой энергии, % . . .	Не менее 41
Средняя удельная энерго-напряженность активной зоны, МВт/м ³ . . .	50
Скорость трансмутации, кг/год . . .	Не менее 250
Активная зона, мм:	
диаметр . . .	4000
высота . . .	3800
Число петель отвода тепла . . .	6
Температура циркулирующего топлива, °С:	
на входе в активную зону . . .	620
на выходе из активной зоны . . .	700
Конструкционный материал . . .	Хромоникелевый сплав ХН80МТЮ
Срок эксплуатации, лет . . .	50

В качестве стартовой загрузки выбрана композиция на основе Pu и Np, Am, Cm. Добавление актиноидов ухудшает размножающие свойства среды, что компенсируется увеличением содержания фторидов трансурановых эле-



Р и с. 3. Зависимость содержания фторидов трансурановых элементов в топливе от концентрации Np, Am, Cm

ментов, растворимость которых в соли при выбранной температуре ограничена и составляет до 2,5 мол. доля, % [2]. Масса топлива и содержание Np, Am, Cm подбирали таким образом, чтобы обеспечить необходимый запас реактивности 1—2% $\Delta K/K$.

Расчеты нейтронно-физических характеристик ЖСР проводили с использованием программного комплекса MCU [3].

Анализ показал, что увеличение содержания Np, Am, Cm выше 28—30% приводит к резкому (степенному) росту фторидов трансурановых элементов в топливной соли (рис. 3). При содержании актиноидов 35% и более достигается предел растворимости 2,5 мол. доля, %. Оптимальным представляется содержание 30%. Такая массовая доля актиноидов соответствует концентрации фторидов трансурановых элементов 1,25 мол. доля, % (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Масса изотопов в стартовой загрузке, кг

Изотоп	Активная зона (объем 47 м ³)	Весь контур (объем 94 м ³)
⁶ Li	1	2
⁷ Li	14 160	28 320
Всего Li	14 161	28 322
⁹ Be	6728	13 456
¹⁹ F	68 709	137 418
²³⁸ Pu	171	342
²³⁹ Pu	3309	6618
²⁴⁰ Pu	1408	2816
²⁴¹ Pu	578	1156
²⁴² Pu	405	810
Всего Pu	5871	11 742
²³⁷ Np	1106	2214
²⁴¹ Am	1255	2510
²⁴³ Am	151	302
Всего Am	1406	2812

При моделировании трансмутационных процессов рассматривались два варианта перегрузки топлива:

непрерывная подпитка путем порционного растворения топливной добавки в соли с непрерывной циклической очисткой от продуктов деления при работе реактора на мощности;

периодический отбор топливной соли с заменой на заранее подготовленную свежую соль во время останова реактора.

Для первого режима перегрузок варьировались удельная энергонапряженность топливной соли 25 и 50 Вт/см³, массовое содержание актиноидов в подпитке 25 и 30%. В кампаниях с энергонапряженностью топливной соли 25 Вт/см³ фториды трансурановых элементов накапливаются интенсивнее, чем в вариантах с энергонапряженностью 50 Вт/см³ (рис. 4).

Временные зависимости скорости утилизации актиноидов рассматриваемых вариантов кампании показывают наличие переходного периода с быстрым ростом скорости утилизации в начале кампании, при котором интенсивнее накапливается ²³⁸Pu, достигаются экстремум и выход на стационарный уровень скорости сжигания (рис. 5).

Общий баланс нуклидов в реакторе за 50 лет, эффективность и средняя скорость утилизации, а также максимально достигаемое содержание фторидов трансурановых элементов приведены в табл. 2. Видно, что увеличение энергонапряженности топлива способствует пропорциональному снижению массы подпитки и максимальной концентрации фторидов трансурановых элементов в топливной соли. Однако значительное повышение энергонапряженности

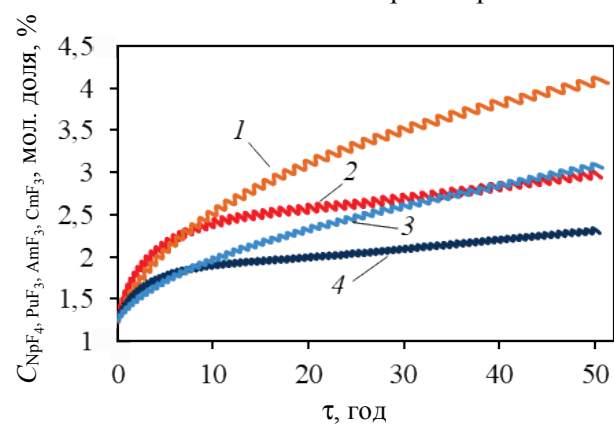


Рис. 4. Изменение содержания фторидов трансурановых элементов в топливе в зависимости от времени работы ЖСР, % Np, Am, Cm, Вт/см³: 1 — 30 и 25; 2 — 30 и 50; 3 — 25 и 25; 4 — 25 и 50

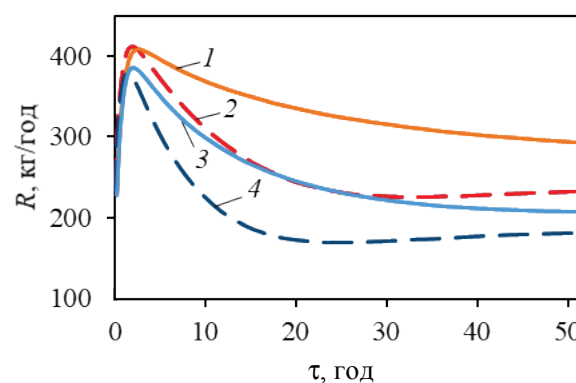
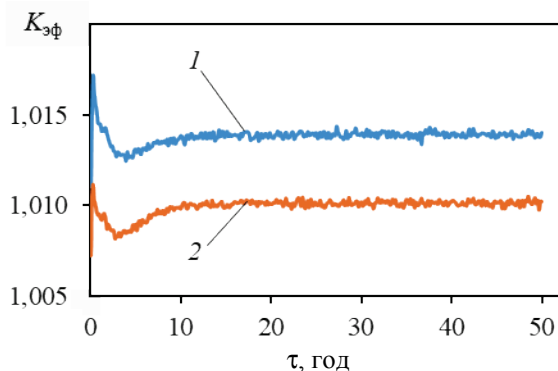


Рис. 5. Зависимость скорости трансмутации Np, Am, Cm от времени работы реактора (обозначения кривых см. на рис. 4)

топлива вследствие ограниченной мощности теплообменных аппаратов потребует увеличения содержания топлива, циркулирующего вне

Таблица 2. Основные результаты расчета выгорания

Параметр	Энергонапряженность, Вт/см ³			
	50		25	
	Содержание Np, Am, Cm, %			
	30	25	30	25
Подпитка за кампанию, кг:				
Pu	38 022	34 270	66 807	54 707
Np	7172	5027	12 602	8027
Am	9104	6382	15 997	10 189
Выжигание (–), накопление (+) за 50 лет, кг:				
U	+610	+282	+2352	+1535
Pu	–24 126	–26 702	–22 377	–25 550
Np	–7114	–5524	–9756	–7671
Am	–7564	–5523	–8526	–6620
Cm	+1560	+1471	+1445	+1500
Состав топлива через 50 лет, % тяж. ат:				
U	2,4	1,64	3,2	2,97
Pu	75,95	76,41	74,57	77,35
Np	4,53	3,52	6,8	4,92
Am	11,23	10,22	13,55	11,98
Cm	5,89	8,21	1,88	2,78
Среднегодовая утилизация, кг/год	262	200	336	256
Эффективность утилизации с уче- том накопления кюрия, %	69,8	72	50,1	55
Максимальная кон- центрация фтори- дов трансурановых элементов за 50 лет, мол. доля, %	2,81	2,01	4,11	3,09



Р и с. 6. Изменение эффективного коэффициента размножения активной зоны от времени работы ЖСР на начало (1) и окончание (2) каждой микрокампании

активной зоны, и будет способствовать снижению скорости сжигания Np , Am , Cm . Кроме того, высокая энергонапряженность топлива приведет к увеличению флюенса на корпус или потребуется его дополнительная защита.

Режим периодического отбора топлива 5—30% объема топливного контура на очистку с подпиткой свежим топливом, содержащим Np , Am , Cm , осуществляется по окончании каждой микрокампании. Концентрация фторидов трансурановых элементов в соли подпитки составляет 2,5 мол. доля, %, что гарантирует не превысить предел растворимости. Соотношение атомов Pu и Np , Am , Cm составляет 70:30.

В ходе вариативных расчетов найдены оптимальные варианты кампании с заменой 5% объема топливного контура. Расчеты позволили определить длительность микрокампании — в среднем 55 сут, при которой коэффициент размножения нейтронов $K_{\text{эф}}$ на начало и окончание каждой микрокампании составляет 1,014 и 1,009 соответственно (рис. 6).

Баланс массы изотопов Pu и Np , Am , Cm по кампании с равновесным временным интервалом 55 сут корректировки состава топливной соли показал возможность достижения скорости утилизации актиноидов в равновесном режиме на уровне 365 кг/год при эффективности сжигания 60% (табл. 3).

Заключение. Полученные результаты показали принципиальную возможность создания

Т а б л и ц а 3. Баланс массы Pu и Np , Am , Cm по кампании

Изотоп	За год	За кампанию
Подпитка, кг		
Pu	7565	378 273
^{237}Np	1433	71 673
^{241}Am	1619	80 964
^{243}Am	199	9955
$^{237}\text{Np} + ^{241}\text{Am} + ^{243}\text{Am}$	3251	162 592
Очистка, кг		
Pu	7207	360 355
^{237}Np	1195	59 727
^{241}Am	1394	69 682
^{243}Am	199	9955
$^{237}\text{Np} + ^{241}\text{Am} + ^{243}\text{Am}$	2788	139 364
Выгорание, кг		
Pu	372	18 582
^{237}Np	239	11 945
^{241}Am	226	11 282
^{243}Am	0	0
$^{237}\text{Np} + ^{241}\text{Am} + ^{243}\text{Am}$	465	23 227

жидкосолевой реакторной установки большой мощности со скоростью трансмутации Np , Am , Cm не менее 250 кг/год. Удельная энергонапряженность, состав топлива, схемы перегрузки топлива и другие характеристики ЖСР имеют запас для дальнейшей оптимизации. Приведенные результаты могут послужить основой и исходными данными для оптимизации конструкции и характеристик жидкосолевого реактора-сжигателя Np , Am , Cm .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пономарев Л.И., Белоногов М.Н., Волков И.А. и др. Быстрый жидкосолевого реактор на основе эвтектики LiF—NaF—KF как сжигатель Np , Am , Cm . — Атомная энергия, 2019, т. 126, вып. 3, с. 123—132.
2. Закиров Р.Я., Игнатьев В.В. Топливный цикл ЖСР-сжигателя трансурановых элементов на основе расплава LiF—BeF_2 . — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2022, вып. 2, с. 38—47.
3. Алексеев Н.И., Большагин С.Н., Гомин Е.А. и др. Статус MCU-5. — Там же, 2011, вып. 4, с. 5—23.

Поступила в Редакцию 14.03.24