

СТАТЬИ

УДК 621.311.25 + 621.039.51

ТЕПЛОВОЙ РЕАКТОР С УРАН-ПЛУТОНИЙ-ТОРИЕВЫМ ТОПЛИВНЫМ ЦИКЛОМ, ОХЛАЖДАЕМЫЙ ВОДОЙ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ДВУХХОДОВОЙ СХЕМЕ ДВИЖЕНИЯ

Глебов А.П., Клушин А.В. (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск)

Водоохлаждаемые реакторы со сверхкритическим давлением теплоносителя, разрабатываемые по международной программе Поколение IV, отнесены к перспективным с внедрением примерно в 2030 г. За рубежом и в нашей стране разрабатывают реакторы с тепловым спектром нейтронов как ближайшую задачу — замена легководных реакторов и впоследствии при тесной решетке твэлов — с быстрым спектром нейтронов [1, 2]. В проектах таких реакторов приняты одноходовые схемы охлаждения, в соответствии с которыми теплоноситель подогревается при его движении в активной зоне снизу вверх. Поскольку подогрев составляет 230 °С в тепловых и 250 °С в быстрых реакторах, то даже небольшие неравномерности распределения энерговыделения твэлов приводят к большим различиям выходной температуры теплоносителя и температуры их оболочек. В реакторе с тепловым спектром нейтронов холодный замедлитель заключен в трубы — «водяные элементы», в полостях между которыми располагаются твэлы в тесной решетке, охлаждаемые восходящим теплоносителем. Сложным является выравнивание поля энерговыделения, поскольку замедлитель значительно подогревается и его плотность изменяется по высоте активной зоны.

Для выравнивания энерговыделения по высоте активной зоны для реактора с быстрым спектром нейтронов предлагается использовать двухходовую схему охлаждения [3, 4].

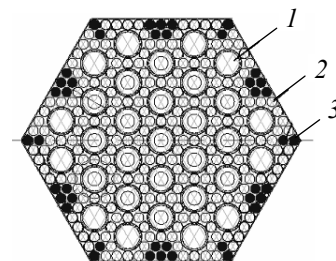
В настоящей статье приведены результаты физического расчета с помощью различных программных комплексов и сравнительного анализа реактора с тепловым спектром нейтронов при одно- и двухходовой схеме охлаждения. Рас-

сматриваются уран-плутоний-ториевые топливные загрузки.

ТВС с цилиндрическими водяными элементами (одноходовая схема охлаждения). Для уменьшения подогрева замедлителя по высоте активной зоны в работе [5] предложено использовать для водяных элементов коаксиальный канал цилиндрической формы с двойной оболочкой и зазором между ними, заполненным водой (рис. 1). Материалом внутренней трубки водяных элементов может быть цирконий, наружной — коррозионно-стойкая сталь. Рассматривается также вариант, в котором наружная трубка до 180 см снизу выполняется из циркония, выше — из стали.

Расчетная модель представляет собой полномасштабное описание реактора по радиусу и высоте с учетом торцевых и радиального отражателей. В качестве прототипа активной зоны использовали ВВЭР-1500, основным отличием являлась конструкция ТВС и мощность. Основные характеристики вариантов активной зоны и ТВС следующие:

Схема охлаждения
одноходовая двухходовая

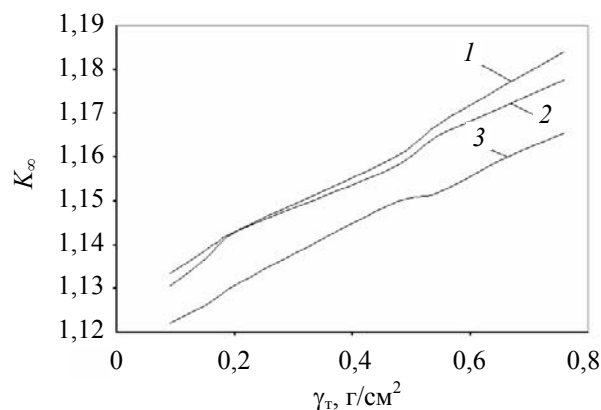


Р и с. 1. Поперечное сечение ТВС: 1 — 37 водяных элементов с внутренней трубкой наружным радиусом 1,205, толщиной 0,05 см, внешней — размером 1,355×0,08 см; 2 — твэл; 3 — 42 трубки, заполненные водой

Мощность реактора:			
тепловая . . .	900	2700	
электрическая . . .	800	1200	
Теплоноситель:			
расход, м ³ /ч . . .	4560	6280	
давление, МПа . . .	25	25	
Температура, °С:			
на входе в реактор . . .	290	290	
на выходе из реактора . . .	540	540	
Активная зона:			
высота, м . . .	4,2	3,55	
эквивалентный диаметр, м . . .	3,85	3,16	
ТВС:			
число . . .	241	163	
шаг размещения, см . . .	23,6	23,6	
		Зона	
		центрально-	периферий-
Твэлы:			
число . . .	210	168	186
шаг, мм . . .	10,07	10,15	12,75
наружный диаметр, мм . . .	9,1	9,1	9,1
толщина оболочки, мм . . .	0,69	0,5	0,69
материал оболочки . . .	ЭП-172	ЭП-172	Zr-сплав
топливо . . .	UO ₂	(U—Pu)O ₂	UO ₂
эффективная плотность топлива, г/см ³ . . .	9,51	9,3	9,3
обогащение ⁵ U/ ⁹ Pu, % по массе . . .	5	7,3	6

Расчеты проведены в ОКБ «Гидропресс» и РНЦ «Курчатовский институт» с помощью программного комплекса САПФИР+РАМУС (для одноходовой схемы охлаждения) [5, 6], а также WIMS+ACADEM, разработанного в ФЭИ.

В расчетной модели подогрев замедлителя в водяном элементе не учитывается, активная зона делится по высоте на семь равных слоев, основными отличиями которых являются температура элементов активной зоны и плотность теплоносителя (табл. 1). Для каждого слоя были получены коэффициенты размножения и библиотеки малогрупповых макросечений (рис. 2).



Р и с. 2. Зависимость коэффициента размножения нейтронов от плотности охлаждающей воды, рассчитанная по программе САПФИР (1), MCU (2), WIMS (3)

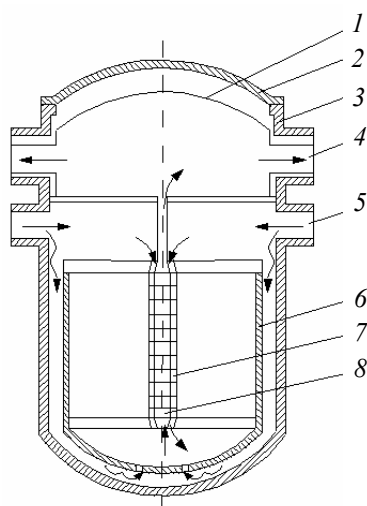
Двухходовая схема охлаждения ТВС. ТВС по радиусу предлагается разделить на две зоны — периферийную и центральную внутренним чехлом, снаружи располагается топливная сборка без чехла. Периферийная зона ТВС охлаждается при движении теплоносителя сверху вниз. Внизу активной зоны имеется общая камера смешения, где потоки теплоносителя из периферийных зон перемешиваются и поступают на вход в центральные зоны ТВС, которые охлаждаются при движении теплоносителя снизу вверх. Пар на выходе из ТВС поступает в общий теплоизолированный паросборник и из него уже на выход из реактора (рис. 3, 4).

Температура теплоносителя в камере смешения предполагается равной 385 °С (близкой к псевдокритической точке). Наличие камеры смешения будет способствовать частичному осаждению в ней продуктов коррозии и уменьшению их выноса во внешний контур.

Конструкция и размер корпуса, поперечное сечение ТВС, размер «под ключ», шаг размещения и число ТВС в активной зоне приняты таки-

Т а б л и ц а 1. Изменение температуры элементов и плотности теплоносителя по высоте слоя от низа активной зоны (толщина слоя 60 см)

Параметр	Слой						
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й
Температура, °С:							
топлива	600	720	860	1000	1000	1060	1100
оболочки твэла	300	352	385	405	405	465	530
оболочки водяного элемента	290	290	290	290	290	290	290
теплоносителя	290	340	370	380	391	407	500
Плотность теплоносителя, г/см ³	0,76	0,66	0,54	0,46	0,2	0,15	0,09

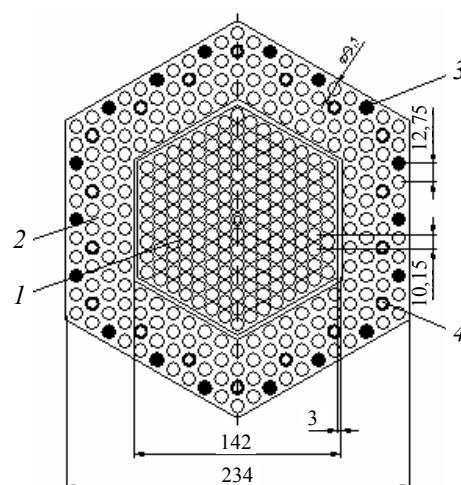


Р и с. 3. Схема охлаждения реактора: 1 — теплоизоляция; 2 — крышка; 3 — корпус; 4, 5 — входной и выходной патрубков соответственно; 6 — шахта; 7, 8 — опускной и подъемный участок ТВС соответственно

ми же, как в ВВЭР-1000. Топливо в твэлах периферийной зоны — оксид урана обогащением 6%, центральной — смешанное на основе отработавшего ядерного топлива с добавкой оружейного плутония, рассматриваются также топливные загрузки с использованием тория.

В расчетной модели ТВС центральной и периферийной зон по высоте разбиваются на семь подзон с изменением средних параметров теплоносителя, температуры топлива и оболочки твэла (табл. 2).

Для уменьшения всплеска энерговыделения на границе центральной зоны с периферийной обогащение топлива в двух последних рядах



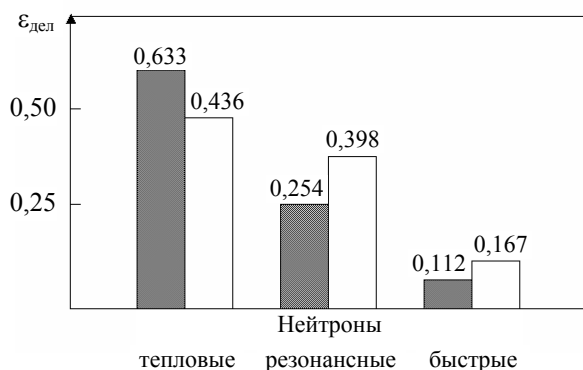
Р и с. 4. Поперечное сечение ТВС: 1, 2 — по 168 твэлов центральной и периферийной зоны соответственно; 3, 4 — по 18 твэлов с гадолиниевым поглотителем и поглощающих стержней СУЗ соответственно

твэлов в центральной зоне принято в 1,5 раза меньше, чем в остальных твэлах. При этом максимальная неравномерность энерговыделения по твэлам в ТВС $q_r = 1,2$.

Для выделенных трех энергетических областей: $10 \text{ МэВ} \geq E \geq 0,1 \text{ МэВ}$ — быстрые, $0,1 \text{ МэВ} > E > 1,01 \text{ эВ}$ — резонансные и $E \leq 1,01 \text{ эВ}$ — тепловые нейтроны рассчитано число нейтронов деления ($\epsilon_{\text{дел}} = \nu_f \Sigma_f \phi$) в долях их общего числа для верхнего и нижнего участков ТВС (рис. 5). В активной зоне преимущественную роль играет деление на тепловых нейтронах (около 56% делений в начале кампании и 58% в конце).

Т а б л и ц а 2. Изменение теплогидравлических параметров по высоте от низа активной зоны (толщина слоя 50 см) с двухходовой схемой охлаждения ТВС

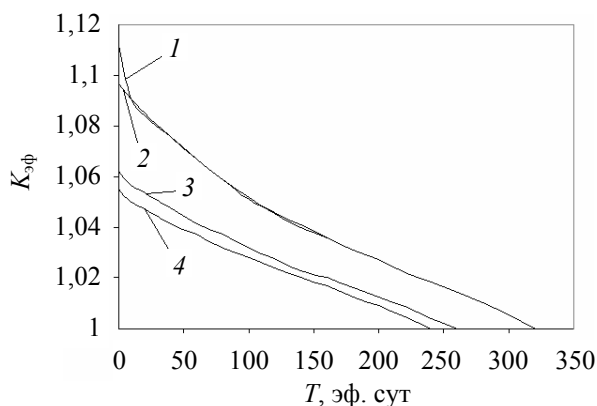
Параметр	Слой						
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й (55 см)
Периферийная зона							
Температура, °С:							
топлива	600	700	720	740	680	620	460
оболочки твэла	395	405	407	410	400	350	320
теплоносителя	384	382	373	350	320	300	290
Плотность теплоносителя, г/см ³	0,33	0,4	0,52	0,62	0,7	0,74	0,76
Центральная зона							
Температура, °С:							
топлива	600	720	900	1030	1100	1100	800
оболочки твэла	390	415	430	460	520	560	580
теплоносителя	386	388	392	400	425	525	535
Плотность теплоносителя, г/см ³	0,3	0,265	0,22	0,17	0,125	0,09	0,085



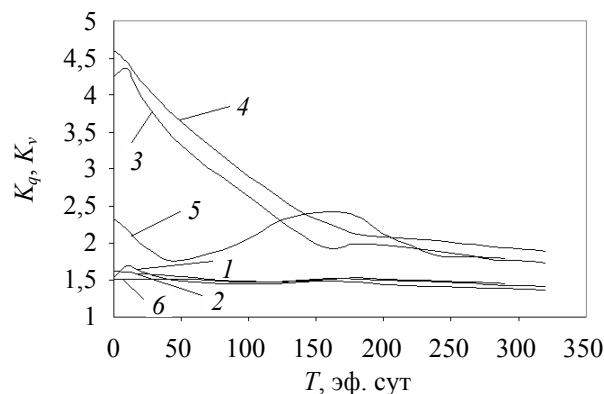
Р и с. 5. Относительный вклад нейтронов различных энергетических групп в суммарное число делений в верхнем (■) и нижнем участке ТВС (□)

Топливный цикл активной зоны — одноходовая схема охлаждения. Расчеты проводили без учета движения СУЗ и обратных связей по изменению теплогидравлических параметров для трехмерной гексагональной геометрии ТВС с полностью стальными оболочками водяных элементов и заменой сплавом циркония до 180 см снизу (рис. 6—9). Кампания реактора 4×240 эф. сут при средней энерговыработке ТВС 22,3 МВт·сут/кг тяж. ат. для варианта со стальными оболочками водяных элементов и 4×320 эф. сут 29,5 МВт·сут/кг тяж. ат. для варианта с заменой стали на цирконий.

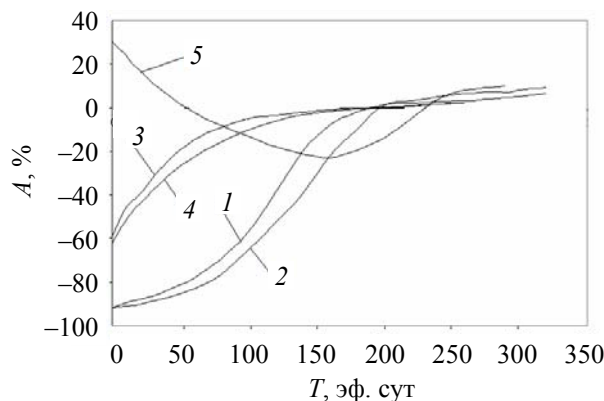
Топливный цикл активной зоны — двухходовая схема охлаждения. Для реактора был выбран 4-кратный топливный цикл с частичными перегрузками ТВС один раз в течение календарного года. Для уменьшения флюенса быстрых нейтронов на корпус принята схема перегрузок с установкой ТВС последнего года выгорания на периферию активной зоны. Для



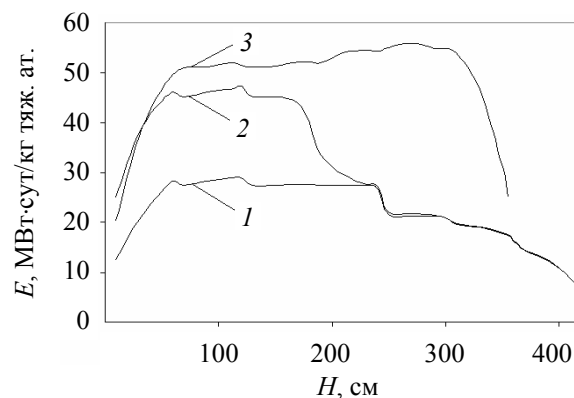
Р и с. 6. Зависимость $K_{эф}$ от межперегрузочного интервала топлива для активной зоны с циркониевыми и стальными оболочками водяных элементов, рассчитанная по программе РАМУС (1, 3), АСАДЕМ (2, 4)



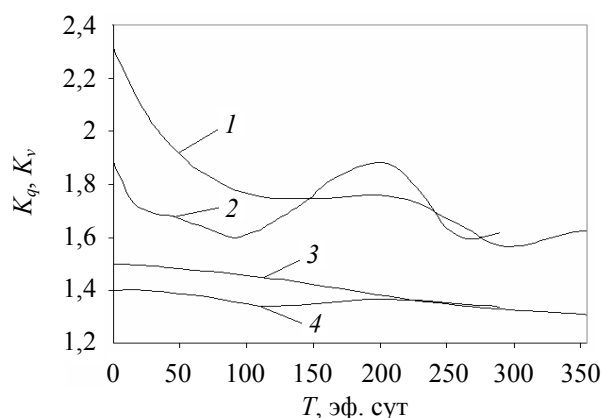
Р и с. 7. Изменение максимального коэффициента неравномерности энерговыделения по объему активной зоны и ТВС при одноходовой схеме охлаждения, рассчитанное по программе РАМУС (1, 4), АСАДЕМ (2, 3), и двухходовой по программе АСАДЕМ (5, 6)



Р и с. 8. Зависимость аксиального оффсета от межперегрузочного интервала выгорания топлива в активной зоне с одноходовой схемой охлаждения, рассчитанная по программе РАМУС для водяных элементов с циркониевыми (1) и стальными оболочками (3), АСАДЕМ с циркониевыми (2) и стальными оболочками водяных элементов (4), и двухходовой схемой охлаждения по программе АСАДЕМ (5)



Р и с. 9. Распределение энерговыработки выгружаемых ТВС по высоте активной зоны с одноходовой схемой охлаждения, рассчитанное по программе АСАДЕМ для водяных элементов со стальными (1) и циркониевыми оболочками (2), и двухходовой (3)



Р и с. 10. Изменение максимального коэффициента неравномерности энерговыделения по объему активной зоны и ТВС для плутоний-ториевой (1, 3) и ториевой загрузки (2, 4)

выравнивания энерговыделения по высоте активной зоны в двух нижних зонах на периферии ТВС нет гадолия. Наряду с полным числом твэлов рассматривался вариант, в котором в нижней зоне вместо топлива в 18 твэлах размещен $ZrH_{1,8}$. Результаты расчетов на рис. 8—10 представлены для варианта с $ZrH_{1,8}$, наличие которого способствует выравниванию энерговыделения. Уменьшение количества топлива не привело к снижению кампании.

Расчеты с учетом движения органов СУЗ и теплогидравлики проводили при номинальной мощности с выходом на стационарный режим перегрузок, минимально контролируемым уровнем мощности, при котором вся активная зона заполнена питательной водой температурой 290 °С, давлением 25 МПа, залив всего реактора холодной водой при 20 °С и 10^{-5} МПа. Для указанных состояний рассчитана исходная реактивность, требуемое число ТВС СУЗ для компенсации и вывода реактора в подкритическое состояние с $K_{эф} = 0,98$ (табл. 3). При учете перемещения органов СУЗ увеличиваются коэффициенты неравномерности энерговыделения ($K_v^{max} \leq 2,8$). Кампания ТВС при полностью извлеченных органах СУЗ равна 4×315 эф. сут при средней энерговыработке ТВС 46 МВт·сут/кг тяж. ат.

Расчетами получено высотное распределение температуры теплоносителя, оболочки и топлива для всех ТВС. Максимальная за кампанию температура теплоносителя, оболочки и топлива составляет 560, 589 и 1150 °С соответственно, расхождение в температуре теплоносителя на выходе из ТВС 510—560 °С, на вы-

Таблица 3. Реактивность Δk , %, требуемое число ТВС СУЗ для ее компенсации при различных состояниях реактора с уран-плутоний-ториевым топливом

Топливный цикл	Номинальная мощность	Минимально контролируемый уровень	Залив холодной водой
U—Pu	4,6	9,8	13,5
	42	66	120
Pu—Th	4,9	8,98	13,74
	42	48	78
Th	5,35	12,38	16,61
	44	68	110

ходе в камеру смешения из периферийных зон ТВС — 372—410 °С.

Поскольку на периферию активной зоны ставятся ТВС последнего года выгорания, их мощность примерно в 2 раза меньше средней. Для выравнивания выходной температуры вводится дросселирование — уменьшение расхода примерно в 2 раза от среднего. Расчеты проводили без учета отклонения параметров реактора (мощности, расхода, давления и др.) от номинальных. Если принять эти отклонения такими же, как в ВВЭР-1000, то по предварительным оценкам их учет приведет к увеличению максимальной температуры теплоносителя и оболочки примерно на 50 °С. Следует также учесть возможные в процессе эксплуатации деформации решетки твэлов и ТВС — «горячие пятна», которые могут увеличить выходную температуру примерно на 40 °С. Таким образом, температура оболочки может достигать 680 °С, что допустимо для жаропрочной коррозионно-стойкой стали и подтверждено практикой работы перегревателей каналов Белоярской АЭС.

Реактор с ториевым топливным циклом и двухходовой схемой охлаждения. Сокращение природного сырья и в конечном итоге переход к самообеспечению топливом является актуальной задачей для перспективных реакторов со сверхкритическим давлением водяного теплоносителя как с уран-плутониевым, так и с уран-ториевым топливом. Однако в реакторе с торием стремление к увеличению КВ ≈ 1 при переходе к тесной решетке твэлов и быстрому спектру сталкивается с труднорешаемой проблемой — залив холодной водой. Как показали предварительные расчеты, при этом режиме вследствие эффективности ^{233}U в тепловой области возни-

кает большая надкритичность (более 20%), с которой трудно справиться штатными средствами СУЗ, а введение жидкого бора из-за небольшого количества теплоносителя в активной зоне неэффективно.

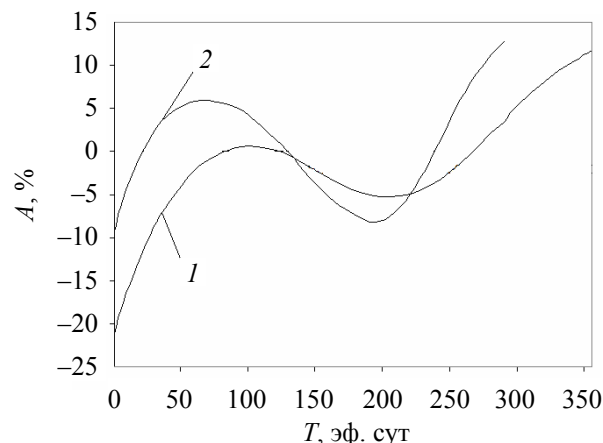
Из опыта эксплуатации АЭС «Шиппинг-порт» (США) с LWBR на уран-ториевом топливе следует, что расширенное воспроизводство можно реализовать и в реакторе с тепловым спектром нейтронов, но это достигается существенным усложнением его конструкции (использование запальной и воспроизводящей зон с разной решеткой твэлов и др.), снижением выгорания и удельной мощности [7]. Возможно, для вовлечения тория в топливный цикл будет более приемлемым переход к эпитепловому спектру нейтронов, при котором обеспечивается КВ 0,7—0,8.

Для удобства сравнения топливных циклов характеристики активной зоны, конструкция ТВС, твэлов приняты такими же, как в варианте с двухходовой схемой охлаждения. Рассмотрены два варианта топливной загрузки: в центральной зоне ТВС — смешанное топливо на основе оружейного плутония (размер твэла и состав топлива, как в приведенном варианте), в периферийной — $(^{233}\text{U}+\text{Th})\text{O}_2$ и чисто ториевый цикл, т.е. топливо $(^{233}\text{U}+\text{Th})\text{O}_2$ в обеих зонах. Плотность урана и тория принималась 0,95 теоретической, как в предыдущем варианте, в периферийной зоне ТВС располагаются 18 поглощающих стержней СУЗ с отличием только обогащения ^{10}B до 80% и 18 твэлов с плотностью гадолиния 0,3 г/см³ (или плотность Gd_2O_3 0,345 г/см³).

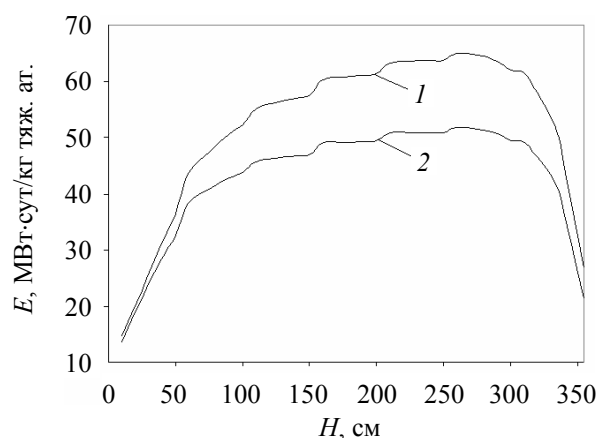
Состав урана в $(\text{U}+\text{Th})\text{O}_2$ -топливе принят равным, % по массе: ^{232}U 0,1, ^{233}U 78, ^{234}U 21,1, ^{235}U 0,77, ^{236}U 0,03, что примерно соответствует составу топлива бланкетов быстрых реакторов. Обогащение ^{233}U принято равным 6% в твэлах обеих зон.

В расчетной модели ТВС центральной и периферийной зон по высоте разбивались на семь подзон (см. табл. 2) с изменением параметров теплоносителя, температуры топлива и оболочек твэла. Расчеты проводили без учета перемещения органов СУЗ и обратных связей по изменению теплогидравлических параметров (рис. 10—12).

Коэффициент воспроизводства, определяемый как отношение количества ядер делящихся



Р и с. 11. Зависимость аксиального оффсета от межперегрузочного интервала выгорания для плутоний-ториевой (1) и ториевой топливной загрузки (2)



Р и с. 12. Распределение энергосинтеза выгружаемых ТВС по высоте активной зоны для плутоний-ториевой (1) и ториевой топливной загрузки (2)

изотопов в выгружаемых ТВС к их начальному значению, оценивается отдельно для центральной, периферийной зон и усредненный по всем ТВС.

Основные характеристики уран-плутоний-ториевого топливного цикла следующие:

	Схема охлаждения			
	одноходовая	двухходовая		
	U	U+Pu	Pu+Th	Th
Начальная загрузка, т . . .	84,56	86	87,92	88,97
Начальная загрузка делящихся изотопов Pu/ $^{235}(^{233})\text{U}$, т . . .	4,22	3,47/2,42	3,47/2,86	4,92
Загрузка делящихся Pu+ $^{235}(^{233})\text{U}$ в одну ТВС, кг . . .	17,5	35,12	38,85	30,22
Кратность перегрузок . . .	4	4,66	4,66	4,66
Реактивность, % . . .	9,64	4,6	4,9	5,35
Длительность межпе-	320	315	355	290

регрузочного интервала, эф. сут . . .				
Обогащение топлива $Pu^{235}(^{233})U$, % . . .	5	7/6	7/6	6
Энерговыработка, МВт·сут/кг тяж. ат.: средняя . . .	29,5	46	51,8	43,2
максимальная по объему активной зоны . . .	49,9	57,9	67,6	57,7
Максимальный за кампанию коэффициент неравномерности энерговыделения K_q/K_v (без СУЗ) . . .	1,57/4,3	1,55/2,45	1,49/2,31	1,39/1,88
Загрузка — делящиеся изотопы, т/год . . .	1,054	1,440	1,398	1,331
Выгрузка — делящиеся изотопы, т/год . . .	0,34	1,051	1,054	0,640
КВ:				
центральная зона . . .		0,90	0,93	0,92
периферийная зона . . .		0,57	0,60	0,51
средний по активной зоне . . .	0,33	0,73	0,754	0,706
Расход природного урана (тория), кг/МВт·сут . . .	0,33	0,102	0,0475	0,0903

Оценка затрат тория приведена без учета на облучение в бланкетах и получение топлива требуемого обогащения.

Заключение. Таким образом, при одноходовой схеме охлаждения в активной зоне с водяными элементами вследствие большого подогрева теплоносителя достигаются большие коэффициенты неравномерности энерговыделения ($K_v \geq 4$) даже при низкой энергонапряженности (в 3 раза ниже, чем в ВВЭР-1000), что приводит к высокой температуре теплоносителя на выходе из активной зоны ($\geq 850^\circ\text{C}$) и проблемам выбора материалов для оболочек ТВЭЛов.

Активная зона с двухходовой схемой охлаждения ТВС имеет преимущества перед первым вариантом, коэффициенты неравномерности с

ляет сократить расход природного сырья примерно в 2 раза по сравнению с ВВЭР-1000. Наряду с топливом ВВЭР может использоваться смешанное уран-плутониевое топливо и отрабатываться технология для перехода к реакторам со сверхкритическим давлением теплоносителя и быстрым спектром нейтронов с КВ ≈ 1 .

Расчеты показали, что в реакторе с эпитепловым спектром нейтронов может эффективно использоваться торий в смешанном цикле или чисто ториевом цикле. При этом могут быть решены проблемы экономической эффективности и обеспечена ядерная безопасность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Oka Y., Koshizuka S. Design concept once-through cycle supercritical pressure light water cooled reactors. — In: Proc. of First Intern. Symp. on Supercritical Water Cooled Reactors. Rep. 101, 2000, p. 1—22.
2. Баранаев Ю.Д., Кириллов П.Л., Поплавский В.М., Шарапов В.Н. Ядерные реакторы на воде сверхкритического давления. — Атомная энергия, 2004, т. 96, вып. 5, с. 374—380.
3. Глебов А.П., Клушин А.В. Реактор с быстроезонансным спектром нейтронов, охлаждаемый водой сверхкритического давления при двухходовой схеме движения теплоносителя. — Там же, 2006, т. 100, вып. 5, с. 349—355.
4. Баранаев Ю.Д., Глебов А.П., Долгов Е.В. и др. Сравнительный анализ физических характеристик реактора ВВЭР-СКД при одно- и двухходовой схемах движения теплоносителя: Препринт ФЭИ-3110, 2007.
5. Тихомиров А.В., Махин В.М., Кинаш П.М. Физические аспекты реактора IV поколения ВВЭР-СКД. — В сб.: Реакторы на сверхкритических параметрах воды. Обнинск, 2007, с. 62—70.
6. Артемов В.Г., Ельшин А.В., Иванов А.С. и др. Разработка нейтронно-физических моделей различных типов реакторов на основе унифицированных алгоритмов ППП САПФИР. — В сб.: X Межд. сем. по проблемам физики реакторов. Москва, сентябрь 1997, с. 34.
7. Freeman L., Beandoin B. Physics experiments and life-time performance of the light water breeder reactor. — Nucl. Sci. Engng, 1989, v. 102, p. 341—364.

Поступила в Редакцию 11.01.09

учетом движения органов СУЗ $K_v \leq 2,8$, температура теплоносителя на выходе не превышает 610°C , температура оболочки $\leq 680^\circ\text{C}$. Спектр нейтронов эпитепловой с КВ $\approx 0,73$, что позво-