

СТАТЬИ

УДК 621.039.516

НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ВВЭР-1000 СО 100%-НОЙ ЗАГРУЗКОЙ ТОПЛИВОМ ИЗ СМЕСИ РЕГЕНЕРИРОВАННОГО УРАНА, ПЛУТОНИЯ И ОБОГАЩЕННОГО УРАНА

*Павловичев А.М., Павлов В.И., Семченков Ю.М. (РНЦ «Курчатовский ин-т»), Кудрявцев Е.Г. (Росатом),
Федоров Ю.С., Бибичев Б.А., Зильберман Б.Я. (Радиевый ин-т им. В.Г. Хлопина)*

В работе [1] в тепловых реакторах предложено использовать топливо на основе уран-плутониевого регенерата (неразделенной смеси изотопов), выделенного из отработавшего топлива этих реакторов, очищенного от других актиноидов и продуктов деления и смешанного (с учетом компенсации четных изотопов урана и плутония) с обогащенным природным ураном. Удельный расход природного урана при производстве такого топлива примерно на 20% меньше, чем при изготовлении уранового топлива, а удельная работа разделения, требуемая для обогащения урановой части смеси, почти не изменяется [2]. Влияющие на безопасность работы ВВЭР-1000 нейтронно-физические характеристики активной зоны со 100%-ной загрузкой урановым и регенерированным уран-плутониевым топливом незначительно отличаются, так как массовая доля плутония в регенерированном топливе составляет примерно 1% [2].

Необходимое содержание делящихся нуклидов в топливе можно обеспечить, добавляя в уран-плутониевый регенерат наряду с обогащенным природным ураном плутоний, выделенный из отработавшего топлива ВВЭР-440. Возможность использования в PWR плутония в составе смешанного уран-плутониевого топлива (смесь регенерированного плутония и обедненного урана) с массовой долей делящихся изотопов плутония 4—6% обоснована многолетним европейским опытом [3].

В активной зоне со смешанным уран-плутониевым топливом эффективность систем управления и защиты уменьшается. Поэтому число ТВС с таким топливом в PWR ограничивается 30—40%, под приводами СУЗ размещают, в основном, ТВС с урановым топливом. Энерговыделение по объему активной зоны вы-

равнивают путем профилирования содержания плутония по поперечному сечению ТВС с уран-плутониевым топливом. При такой загрузке активной зоны PWR смешанным топливом не требуется значительных конструктивных изменений в системе управления и защиты, но задача компоновки активной зоны усложняется.

Расчетные нейтронно-физические характеристики активной зоны ВВЭР-1000 с 30—40%-ной загрузкой смешанным уран-плутониевым топливом на основе оружейного плутония приведены в работах [4, 5]. Практический опыт использования плутония в тепловых реакторах в нашей стране отсутствует. Для исследования нейтронно-физических характеристик активной зоны ВВЭР-1000 со 100%-ной загрузкой регенерированным топливом, состоящим из смеси уран-плутониевого регенерата, регенерированного плутония и высокообогащенного урана, проведены сопоставительные расчеты активной зоны с загрузкой штатным урановым и регенерированным уран-плутониевым топливом. Рассмотрены пять вариантов топливной загрузки ВВЭР-1000: в первом варианте загрузка полностью формировалась на основе топлива из обогащенного природного урана, в остальных четырех вариантах — только из регенерированного уран-плутониевого топлива.

Массовое содержание уран-плутониевого регенерата в уран-плутониевом топливе составляло 80%, суммарная доля регенерированного плутония и обогащенного урана — 20%. Массовое содержание регенерированного плутония, добавляемого в уран-плутониевый регенерат в этих четырех вариантах, составляло 1, 2, 3, 4% соответственно, доля обогащенного урана — 19, 18, 17 и 16%. С учетом плутония, содержащегося в уран-плутониевом регенерате, его суммар-

Нейтронно-физические характеристики стационарной загрузки активной зоны ВВЭР-1000 с урановым и регенерированным уран-плутониевым топливом

Нейтронно-физические характеристики	Урановое топливо	Регенерированное уран-плутониевое топливо			
		Вариант			
		1	2	3	4
Среднее обогащение топлива подпитки по ^{235}U , % по массе	4,33	3,81	3,45	3,09	2,73
Среднее обогащение топлива подпитки по сумме нуклидов ($^{235}\text{U} + ^{239}\text{Pu} + ^{241}\text{Pu}$), % по массе	4,33	5,15	5,47	5,79	6,1
Содержание плутония в топливе:					
% по массе	0	2	3	4	5
кг	0	360	550	730	910
Экономия природного урана, %	0	27,4	36,2	44,8	53,5
Экономия работы разделения, %	0	8,8	20,4	31,8	43,2
Длительность работы реактора между перегрузками, эф. сут	297	297	297	297	297
Среднее выгорание топлива, МВт·сут/ кг тяж. мет.	49,2	49,2	49,2	49,2	49,2
Максимальное (среднее по ТВС) выгорание топлива, МВт·сут/кг тяж. мет.	52,2	53,6	53,3	53,5	54,3
Максимальное выгорание топлива ТВЭЛ, МВт·сут/кг тяж. мет.	57,6	59	58,7	58,4	58,1
Максимальная мощность ТВС, отн. ед.	1,3	1,3	1,29	1,29	1,3
» » ТВЭЛ, отн. ед.	1,46	1,47	1,47	1,48	1,48
Максимальная линейная тепловая мощность ТВЭЛ (с учетом коэф-фициента запаса), Вт/см	343	349	351	354	357
Коэффициент реактивности:					
по температуре теплоносителя, $10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$:					
начало кампании	-31,8	-40,1	-40,9	-41,4	-41,5
конец »	-68,1	-68,4	-68,6	-68,5	-68,2
по плотности теплоносителя, 10^{-2} г/см^3 :					
начало кампании	14,7	19,4	19,7	19,9	19,8
конец »	31,1	31,8	1,8	31,6	31,4
по температуре топлива, $10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$:					
начало кампании	-2,5	-2,9	-2,8	-2,8	-2,8
конец »	-2,7	-3	-2,9	-2,9	-2,9
по мощности реактора, 10^{-5} МВт^{-1} :					
начало кампании	-0,50	-0,59	-0,58	-0,58	-0,58
конец »	-0,71	-0,74	-0,74	-0,74	-0,73
по концентрации борной кислоты, $10^{-2} \text{ г·кг}^{-1}$:					
начало кампании	-1,4	-0,96	-0,84	-0,75	-0,67
конец »	-1,6	-1,12	-0,98	-0,87	0,79
Эффективная доля запаздывающих нейтронов деления, %:					
начало кампании	0,63	0,55	0,52	0,5	0,48
конец »	0,56	0,53	0,52	0,5	0,49
Эффективное время жизни мгновенных нейтронов деления, 10^{-5} с :					
начало кампании	2	1,3	1,2	1	0,9
конец »	2,3	1,6	1,4	1,2	1,1
Эффективность рабочей группы ОР СУЗ, номинальная мощность, % $\Delta\rho$:					
начало кампании	0,84	0,74	0,71	0,68	0,66
конец »	0,8	0,75	0,73	0,7	0,69
Эффективность аварийной защиты без одного наиболее эффективного органа СУЗ, номинальная мощность, % $\Delta\rho$:					
начало кампании	7,5	7,2	6,9	6,6	6,4
конец »	7,3	7,3	7,1	6,8	6,5

3,6 и 5% соответственно. Среднее обогащение

зона с урановым топливом.

Таким образом, анализ нейтронно-физических характеристик не выявил принципиальных ограничений возможности 100%-ной загрузки активной зоны ВВЭР-1000 регенерированным уран-плутониевым топливом при содержании плутония в топливе 2—5% по массе. Однако в связи с значительным уменьшением эффективности систем регулирования реактивности (как механической, так и жидкостной) при увеличении удельного содержания плутония в топливе для дальнейшего обоснования возможности 100%-ной загрузки ВВЭР-1000 регенерированным уран-плутониевым топливом с содержанием плутония 2% и более необходимо исследовать динамические характеристики активной зоны, включая анализ проектных реактивных аварий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров 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. — Там же, 2006, т. 101, вып. 6, с. 407—413.
3. Горский В.В. Состояние и перспективы применения MOX-топлива в легководных реакторах. — Атомная техника за рубежом, 2000, № 6, с. 8—15.
4. Alyeshin S.S., Bolshagin S.N., Bychkova N.A. et al. Characteristics of VVER-1000 with 1/3 core loaded by MOX fuel plutonium from surplus Russian nuclear weapons. — In: Proc. PHYSOR 2002. ANS Intern. Topical Meeting. Seoul, Korea, Oct. 7—10, 2002, p. 261.
5. Ponomarev-Stepnoi N.N., Pavlovichev A.M., Styurin Yu.A. Russian Weapon Plutonium Disposition in VVER-1000 reactors. — In: Proc. of Intern. Conf. Global'2005. Tsukuba, Japan, Oct. 9—13, 2005, paper 570, p. 6.
6. Novikov A.N. Development of VVER physical calculation codes. — In: Proc. of the Tenth Symp. of AER. Moscow, Russia, Oct. 18—22, 2000, p. 433—448.
7. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций. ПНАЭГ-1-0024-90 (ПБЯ РУ АС-89). М.: Энергоатомиздат, 1990.
8. Design of the Reactor Core for Nuclear Power Plants. Safety Guide № NS-G-1.12. Vienna: IAEA, 2004.

Поступила в Редакцию 6.06.07

УДК 621.039.56

МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ МОЩНОСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ИБР-2 С УЧЕТОМ МЕДЛЕННЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Ли Ен Чхан, Пепельшев Ю.Н. (ОИЯИ)

Изучение мощностной обратной связи в импульсном реакторе ИБР-2 в основном было связано с исследованием быстрых эффектов, действующих на малом интервале времени (минуты и менее). Эти эффекты отражают тепловые, гидродинамические и механические процессы, происходящие внутри активной зоны. Быструю обратную связь можно представить в виде суммы трех инерционных звеньев с нелинейными элементами (постоянные времени короче 10 с) [1] или пяти, два из которых имеют медленные постоянные времени 5—15 мин [2, 3].

Кроме внутриреакторных быстрых процессов, существенное влияние на реактивность и соответственно на эксплуатационные характеристики оказывают и медленные процессы, обусловленные изменением состояния конструктивных элементов из ближайшего окружения параметры. В качестве иллюстрации методики построения модели использовали данные, полу-

активной зоны, например, стационарных отражателей, тепловой и радиационной защиты, а также параметров, задаваемых извне активной зоны, таких, как температура натрия на входе в активную зону, его расход и положение органов регулирования. Кроме того, в качестве медленного процесса для ИБР-2 можно рассматривать и выгорание топлива. Мощностной эффект реактивности, постоянные времени которого больше 1 ч и которые действуют в течение одного или нескольких реакторных циклов, принято считать медленной мощностной обратной связью. В настоящей работе в каждом реакторном цикле выделен полный мощностной эффект реактивности как сумма быстрого и медленного эффектов обратной связи. На основе выделенного эффекта реактивности построена универсальная модель динамики ИБР-2 и определены ее значения в нескольких последних циклах работы реактора перед его остановом в конце 2006 г.