

Пуск печи проводится в следующем порядке:

в отверстиях панелей печи устанавливаются пусковые нагреватели;
ванна электропечи заполняется стеклосилом, близким по химическому составу реальному стеклу;
подается вода на охлаждение панелей, электродов и сливного устройства;

включаются пусковые нагреватели, и проводится сушка кладки печи и стеклосило;

по окончании процесса сушки электропечь пусковыми нагревателями разогревается до температуры, при которой стекломасса начинает пропускать электрический ток;

подается напряжение на электроды, и печь разогревается до рабочей температуры;

демонтируются пусковые нагреватели, технологические отверстия в панелях закрываются пробками.

Установка работает следующим образом. Исходный солевой раствор подается в прямоточный испаритель, где происходит его концентрирование в 2,5 раза. Концентрат непрерывно поступает в смеситель электропечи. Одновременно питателем из узла дозирования флюса подается измельченный флюс. Из смесителя жидкая паста подается на зеркало расплава электропечи. Смесью раствора и флюса, попадая на поверхность расплава стекла, обезвоживается, соли кальцинируются, расплавляются, образуя боросиликатное стекло. Накопленное в варочной и сливной зонах электропечи стекло сливается в контейнер, установленный на поворотном столе кругового конвейера. Контейнер, заполненный стеклом, герметично закрывается крышкой, после охлаждения его наружная поверхность дезактивируется до допустимого уровня радиоактивного загрязнения, после чего удаляется на хранение.

Парогазовая смесь через водоохлаждаемый газосход электропечи поступает в барботер-холодильник, в котором водяной пар конденсируется и происходит первичная очистка от аэрозолей и оксидов азота, неконденсирующиеся газы охлаждаются до 40—50 °С и, пройдя через фильтры грубой и тонкой очистки, поступают в абсорбционную колонну для окончательной очистки от оксидов азота. Очищенные неконденсирующиеся газы вакуум-насосом выбрасываются в атмосферу. Кислый раствор после колонны может быть использован для регенерации ионообменных фильтров.

Электропечь после выработки ресурса или выхода ее из строя дистанционно удаляется из рабочего помещения на место демонтажа или хранения.

Конструкция электропечи и в целом установки остекловывания более сложная, чем установки битумирования или цементирования, а процесс остекловывания более энергоемкий. Однако меньший объем конечного продукта и его большая стойкость к выщелачиванию радионуклидов позволяет сократить расходы на хранение или захоронение отходов АЭС и повысить надежность защиты окружающей среды.

Поступило в Редакцию 9.12.95

УДК 621.039.54

ОБРАЗОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ В ТОПЛИВНОМ СЕРДЕЧНИКЕ ВВЭР-440

Щеглов А.С., Сидоренко В.Д., Проселков В.Н., Большагин С.Н. (ИЯР РНЦ «Курчатовский ин-т»), Смирнов В.П., Смирнов А.В., Четвериков А.П. (ГНЦ НИИАР), Цибуля В.А. (АООТ «Машиностроительный завод»)

При теплофизическом расчете твэла необходимо знать распределение энерговыделения по радиусу топливного сердечника, влияющее на температурное поле в нем [1], и обусловленное этим распределением выгорание по радиусу топливного сердечника. Особенно важно знать распределение выгорания по радиусу топлива при среднем по поперечному сечению твэла выгорании больше 45—50 МВт·сут/кг, когда оно в тонком периферийном слое начинает превышать 60—75 МВт·сут/кг. Такое выгорание является пороговым с точки зрения образования хорошо различимой измененной микроструктурной области на границе топливной таблетки — так называемого рим(rim)-слоя [2]. Этот слой характеризуется наличием множества мелких газовых пузырьков, исчезновением исходной зеренной структуры и образованием новых субзерен значительно меньшего размера (менее 1 мкм).

Поверхностный слой значительно влияет на интегральные характеристики твэла в целом. Топливо этого слоя характеризуется резким уменьшением теплопроводности и прочности и значительным усилением выхода газообразных продуктов деления, в том числе атермического. Образование и развитие такого слоя приводит к созданию теплового барьера на пути тепла из топлива и ухудшению теплопроводности зазора топливо—оболочка при выходе газообразных продуктов деления. В результате значительно повышается температура топлива, возрастает суммарный выход газообразных продуктов деления и как следствие значительно увеличивается давление газовой среды под оболочкой, которое при выгорании по твэлу выше 60 МВт·сут/кг может стать определяющим фактором, влияющим на его работоспособность.

В настоящей работе рассчитывали распределение энерговыделения и выгорания по радиусу топливного сердечника в зависимости от среднего по поперечному сечению выгорания. В расчетах поперечное сечение топливного сердечника разбивали на 20 зон равной площади и в зависимости от выгорания в каждой зоне определяли изменение нуклидного состава топлива и относительного энерговыделения.

В твэлах энергетических реакторов (с низкообогащенным топливом) изменение энерговыделения в начальный момент работы невелико и вызвано уменьшением плотности потока тепловых нейтронов из-за их поглощения в первую очередь наружными слоями топлива. Однако при выгорании накапливается плутоний, образующийся за счет резонансного поглощения замедляющихся нейтронов ядрами ^{238}U , причем быстрее всего в наружном слое топлива. Перераспределение делящихся изотопов по радиусу топливного сердечника увеличивает неравномерность энерговыделения [1].

По программе ТВС [3] был проведен расчет нейтронно-физических характеристик двух типов одно-родных сборок ВВЭР-440 применительно к активной зоне с 349 ТВС начальным обогащением топлива 3,6 и 4,4%. Расчет проводился в двумерной геометрии (в поперечном сечении активной зоны) в угле симметрии 30 градусов при средней концентрации бора в теплоносителе 0,5 г/кг, нуклидный состав топлива изменяли с шагом 0,1 МВт·сут/кг.

При расчете рассматривалась ТВС со средними по активной зоне нейтронно-физическими характеристиками: удельная мощность 86,28 Вт/см³, температура топлива во всем интервале выгорания 900 К, отравление ^{135}Xe и ^{149}Sm стационарное, шаг расположения в активной зоне 14,7 см, размер «под ключ» 14,4 см, плотность топливного сердечника (равномерно размещенного по всему свободному объему радиуса 3,86 мм) из диоксида урана 10,27 г/см³, дистанционирующие решетки выполнены из нержавеющей стали, остальные конструкционные материалы — из циркониевого сплава, толщина стенки 0,15 см, температура теплоносителя 558 К, плотность теплоносителя 0,7506 г/см³. Результаты расчета приводятся для твэла, имеющего средние по ТВС нейтронно-физические характеристики.

В работе [2] приводились расчетные значения относительного энерговыделения и выгорания по радиусу топлива. В настоящей работе приведены уточненные данные, рассчитанные для твэла ВВЭР-440 с топливом начальным обогащением 3,6 и 4,4% (см. таблицу). Для перевода полученных данных к случаю топлива с центральным отверстием и меньшего наружного радиуса необходимо разбить поперечное сечение реальной таблетки на 20 зон с радиусом, вычисляемым из условия равенства площадей этих зон. При построении рис. 1—3 принималось, что радиус центрального отверстия в топливном сердечнике равен 0,8 мм при наружном 3,7825 мм.

Относительное энерговыделение и распределение выгорания при среднем 65 МВт·сут/кг по радиусу топливного сердечника

Радиус зоны, мм	Относительное энерговыделение при среднем выгорании, МВт·сут/кг				Выгорание в слое, МВт·сут/кг
	0	10	40	65	
Обогащение 3,6%					
0—0,863	0,968	0,882	0,764	0,720	53,9
2,114—2,284	0,978	0,905	0,809	0,774	56,0
2,990—3,112	1,009	0,961	0,895	0,875	60,2
3,559—3,662	1,040	1,136	1,267	1,324	77,7
3,662—3,762	1,048	1,290	1,619	1,744	94,0
3,762—3,860	1,058	1,677	2,501	2,746	134,5
Обогащение 4,4%					
0—0,863	0,961	0,889	0,784	0,734	54,9
2,114—2,284	0,974	0,912	0,825	0,785	56,9
2,990—3,112	1,011	0,968	0,905	0,880	60,7
3,559—3,662	1,048	1,128	1,246	1,308	76,5
3,662—3,762	1,058	1,263	1,566	1,708	91,3
3,762—3,860	1,069	1,598	2,363	2,668	127,5

На рис. 1 приведено распределение выгорания по радиусу таблетки с начальным обогащением 4,4% при среднем по сечению выгорании 30, 40, 50 и 65 МВт·сут/кг, т.е. в области реального для современных твэлов ВВЭР-440 выгорания, при котором начинает образовываться и существует явно выраженный поверхностный слой. Аналогичный вид имеет радиальное распределение выгорания при начальном обогащении 3,6%.

На рис. 2 показано радиальное распределение выгорания при начальном обогащении 4,4% и среднем по сечению выгорании 63,8 МВт·сут/кг, а также экспериментально измеренное распределение выгорания при том же среднем.

Для масс-спектрометрического анализа (измерения выгорания по радиусу топливного сердечника) из участков твэлов с экспериментально определенным средним выгоранием были отобраны образцы топлива

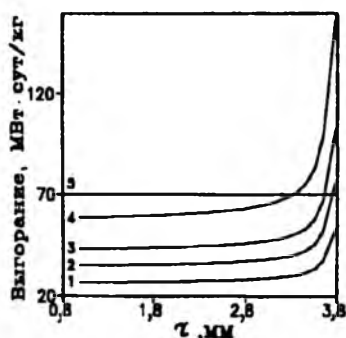


Рис. 1. Расчетная зависимость выгорания по радиусу топлива с начальным обогащением 4,4% при среднем выгорании 30 (1), 40 (2), 50 (3), 65 МВт·сут/кг (4) и пороговое значение образования поверхностного слоя (5)

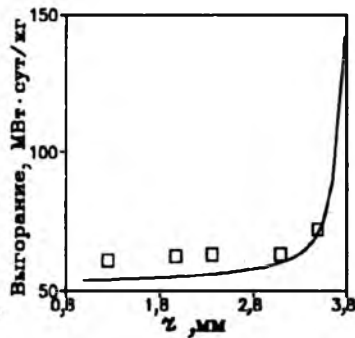


Рис. 2. Расчетная зависимость выгорания (—) по радиусу таблетки с начальным обогащением 4,4% и экспериментальные значения (□)

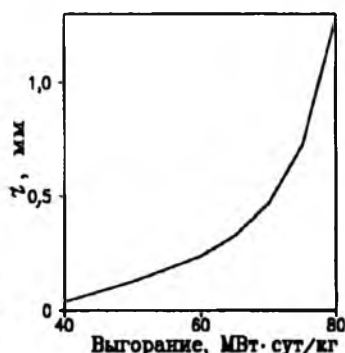


Рис. 3. Расчетная зависимость толщины поверхностного слоя по радиусу от среднего выгорания для топлива обогащением 4,4%

в пяти точках по радиусу ультразвуковым способом, позволяющим отбирать пробы без изменения структуры и физико-химических свойств. Отобранные образцы имели форму цилиндра диаметром 0,85, высотой 2 мм. Поэтому при интерпретации экспериментальных результатов следует учитывать, что результаты относятся к определенной зоне, а не «точке». Сравнение экспериментальных и расчетных данных показывает удовлетворительное соответствие.

Рассматривалось образование и развитие поверхностного слоя: в качестве критерия его образования принято превышение выгорания 70 МВт·сут/кг. Так как выгорание в слоях является средним, то для определения максимального (в периферийном слое), нахождения радиуса зоны с выгоранием, большим порогового, и расчета образования поверхностного слоя использовалась линейная интерполяция. Получено, что в топливном сердечнике ВВЭР-440 поверхностный слой начинает образовываться при среднем по поперечному сечению выгорании больше 36 или 37 МВт·сут/кг для начального обогащения 3,6 или 4,4% соответственно. На рис. 3 приведены расчетные зависимости толщины этого слоя по радиусу от среднего выгорания для топлива с начальным обогащением 4,4%. Фактически такая же зависимость получена для топлива с начальным обогащением 3,6%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сидоренко В.Д., Щеглов А.С. Нейтронно-физические характеристики активной зоны ВВЭР, влияющие на работоспособность твэлов. — Атомная энергия, 1993, т. 74, вып. 6, с. 533—535.
2. Piron J., Bordin B., Geoffroy G. e.a. Fuel microstructure and RIM effect at high burn-up. — In: Proc. Intern. Top. Meet. on Light Water Reactor Fuel Performance. Florida, USA, 17—21 apr., 1994, p. 321—327.
3. Novikov A.N., Pshenin V.V., Lizorkin M.P. e.a. Code packade for WWER cores analysis and some aspects of fuel cycles improving. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1992, вып. 1, с. 3—9.

Поступило в Редакцию 26.01.96

Рефераты статей

Продолжение. Начало см. на с. 212

УДК 621.039.573

Васильев А.П., Горин Н.В., Кандиев Я.З., Козыбаев Р.М., Малышкин Г.Н., Самарин С.И., Шмаков В.М., Павшук В.А., Казьмин Ю.М., Пахниц В.А., Черепнин Ю.С. Верификация методик расчета характеристик импульсного графитового реактора. — Атомная энергия, 1996, т. 80, вып. 3, с. 150—153.

Проведена верификация различных методик определения параметров импульсного графитового реактора на тепловых нейтронах сравнением расчетных параметров ИГР с экспериментальными. Верифицированы трехмерные программы решения задач переноса частиц методом Монте-Карло (российские ПРИЗМА-Д, КЛАН и американская MCNP-4A) и методика оценки параметров импульсов делений реактора. Рис. 2, табл. 2, список лит. 10 назв.