

сителя на основе свинца чрезвычайно низка, так что эти теплоносители сами по себе являются хорошими матрицами при окончательном захоронении. В этом отношении тяжелые жидкометаллические теплоносители имеют очевидное преимущество перед натрием, который до захоронения должен быть обязательно переведен в химически пассивное состояние.

Таким образом, радиационные свойства теплоносителей на основе натрия, свинца—висмута и свинца, облученных в высокоэнергетическом спектре быстрого реактора, значительно различаются, и это может оказаться решающим при обращении с ними как с радиоактивными отходами. Радиационно безопасное захоронение может быть осуществлено в отношении всех трех теплоносителей, хотя тяжелые теплоносители имеют здесь существенные преимущества. Практическому приближению к безотходной технологии наилучшим образом из трех рассмотренных отвечает натриевый теплоноситель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усанов В.И., Цикунов А.Г., Троянов М.Ф. и др. Остаточная радиоактивность материалов при снятии быстрых реакторов с эксплуатации. — Атомная энергия, 1995, т. 78, вып. 6, с. 417—424.
2. Forrest R., Enclacott D., Khursheed J. FISPACT-Program Manual. Nuclear Physics Division. Harwell Laboratory. AERE-M3634, March, 1988.
3. Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Система групповых констант БНАБ-93. Верификационный отчет. М., ЦНИИатоминформ, 1995.
4. Нормы радиационной безопасности (НРБ-96). М., Госкомсанпиднадзор России, 1996.
5. International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety Series № 115. Vienna: IAEA, 1996.

Поступила в Редакцию 4.06.99

УДК 621.039.548

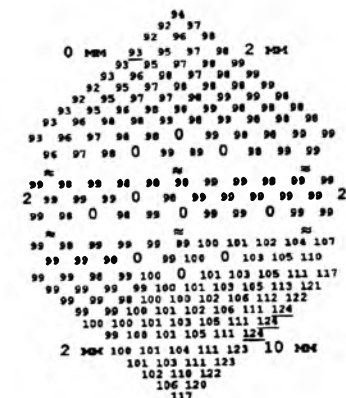
УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ИСКРИВЛЕНИЯ ТВС ВВЭР-1000 НА МОЩНОСТЬ ТВЭЛОВ

Пономаренко Г.Л. (ОКБ «Гидропресс»)

В активной зоне ВВЭР-1000 возможно искривление ТВС, в результате чего возникают увеличенные (до 10 мм и более) или уменьшенные (до 0 мм) зазоры между ними, что влияет на энерговыделение в близлежащих твэлах. На рис. 1 видно, что возле увеличенного до 10 мм зазора у одной из граней ТВС мощность твэлов в крайнем

ряду повышается на 24%, во втором ряду на 11—13%. Увеличенные до 10 мм зазоры у двух смежных граней ТВС повышают мощность углового твэла на 36%. Такие расчеты проводили по прецизионной программе MCU [1], что занимает около 10 сут непрерывной работы компьютера Pentium-200 МГц на каждый вариант. Невозмущенный вариант соответствует номинальным размерам зазоров в активной зоне, возмущенный — измененным зазором.

В то же время анализ распределения мощности в активной зоне (рис. 2, 3, а) показывает, что число наиболее нагруженных (опасных при росте зазоров) твэлов в активной зоне относительно невелико. На основе результатов прецизионных и дорогостоящих опорных расчетов типа показанных на рис. 1 и проектных расчетов по программам [2] типа рис. 2, 3, а смоделировано по специально разработанной программе МЕХ потвэльное распределение энерговыделения в активной зоне при любом случайном распределении зазоров меж-

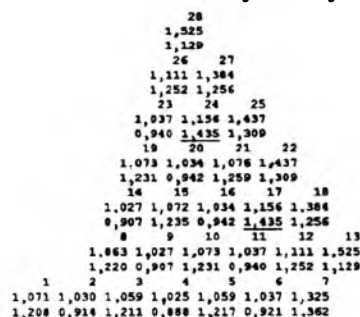


Р и с. 1. Распределение энерговыделения по твэлам ТВС ВВЭР-1000 обогащением топлива 4,4% с возмущенными зазорами по отношению к невозмущенному варианту ($\times 100$)

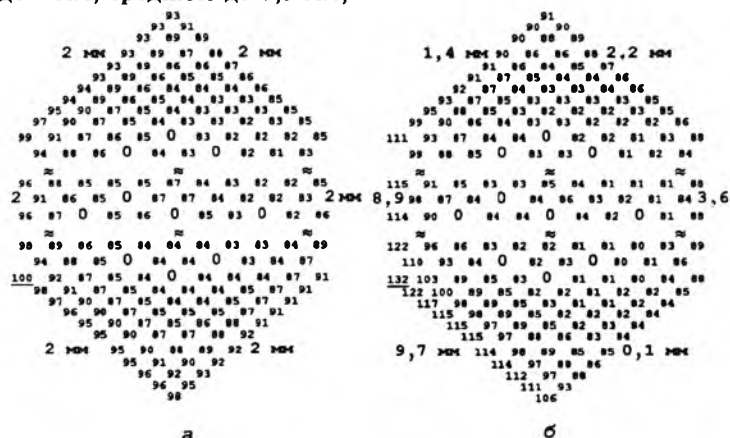
ду ТВС. Моделирование распределения энерговыделения основано на предположении линейной зависимости энерговыделения от зазора и аддитивности вклада в энерговыделение разных (в частности, смежных) зазоров вокруг ТВС. На рис. 3, б представлен пример такого распределения для ТВС № 17 (см. рис. 2), содержащей наиболее энергонапряженный твэл. В рамках рассматриваемой задачи результаты моделирования удовлетворительно (в пределах 1—2%) согласуются с точным, но длительным расчетом по программе MCU. Таким образом, появилась возможность оперативно рассчитать число твэлов L , энерговыделение которых превышает некоторый уровень, и пренебречь числом твэлов в случае малости. При этом коэффициент увеличения энерговыделения K за счет роста зазоров $K = f(L)$ есть статистическая характеристика повышения мощности твэлов в активной зоне с искривленными ТВС и увеличенными зазорами между ними, рассматриваемая как составляющая общего инженерного коэффициента запаса в мощности твэл? на неопределенности технологических, эксплуатационных и расчетных факторов. В частности, число твэлов может быть выбрано исходя из условия не превысить регламентируемые [3] пределы их повреждения. Такому условию с запасом удовлетворяет число твэлов 0,01% (около пяти твэлов на всю активную зону). Следует отметить, что коэффициент увеличения энерговыделения в таком представлении зависит от конкретной топливной загрузки и распределения зазоров между ТВС в активной зоне.

Получение распределения для генеральной совокупности требует рассмотрения большого числа объектов (активных зон). На 163 ТВС в активной зоне приходится более 500 зазоров между ТВС и между ТВС и выгородкой. Сохранение шестигранной геометрии дистанционирующих решеток, тесное расположение ТВС в активной зоне и ограниченные возможности их поперечного смещения позволяют в первом приближении применить метод Монте-Карло для решения поставленной задачи, для чего специально разработана программа «Зазор», в которой моделируется реальная конфигурация в плане активной зоны и ограничивающего сечения выгородки ВВЭР-1000. Моделируется взаимное «толкание» ТВС с разной реакцией на сдвиг соседних ТВС, что позволило определить плотность распределения зазоров, условно отражающую степень искривления ТВС (рис. 4) малую с зазорами до 4 мм, среднюю до 7,9 мм, большую до 10 мм, гипотетическую (на рис. 4 не показано) 0—21 мм.

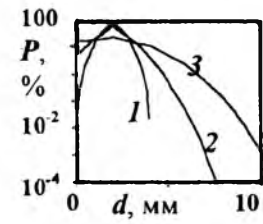
Указанный диапазон можно рассматривать как усреднение по высоте активной зоны больших зазоров в середине и меньших вблизи торцов активной зоны, что оправдано рассмотрением их влияния на интегральную по высоте мощность твэлов. Для получения данной плотности распределения рассматривалось последовательное прохожде-



Р и с. 2. Типичное распределение неравномерности энерговыделения в активной зоне ВВЭР-1000 в секторе симметрии 60°, рассчитанное по программам БИПР-7 и ПЕРМАК: верхнее число — номер ТВС, среднее — коэффициент неравномерности энерговыделения по сечению ТВС, нижнее — его произведение на относительную мощность ТВС



Р и с. 3. Распределение энерговыделения по твэлам ТВС № 17 с номинальными (а) и возмущенными зазорами (б) по отношению к наиболее энергонапряженному твэлу невозмущенной активной зоны соответственно ($\times 100$)



Р и с. 4. Плотность вероятности распределения зазоров между ТВС в активной зоне ВВЭР-1000: 1, 2, 3 — малое, среднее, большое искривление соответственно

ние всех ТВС для большого числа (до 100 тыс.) активных зон, что можно считать генеральной совокупностью. Плотность распределения зазоров может быть привязана к реальной активной зоне путем определения максимального зазора измерением, сложным термомеханическим расчетом или экспертным решением. Кроме того, корреляции между зазором и каким-либо параметром (энерговыделением, выгоранием, годом работы ТВС, местоположением в активной зоне и т.п.) в случае их обнаружения легко могут быть смоделированы в используемой методике и программе МЕХ.

В таблице приведено максимальное энерговыделение твэлов при увеличении зазора в зависимости от степени искривления ТВС. Средний коэффициент увеличения энерговыделения $K_{cp} = f(L)$ рассчитывали по программе МЕХ следующим образом.

Сначала определяли по программе ПЕРМАК невозмущенное потвэльное распределение энерговыделения, затем случайным моделированием с использованием плотности вероятности распределения (см. рис. 4) размеры шести зазоров вокруг каждой ТВС. После этого моделировали возмущенное распределение энерговыделения по типу рис. 3, б. Рассматривали до 10 тыс. активных зон по 163 ТВС с 312 твэлами в каждой. Коэффициент увеличения энерговыделения за счет роста зазоров выше среднего на 2%, что отражает реальные флуктуации в реализации числа опасных зазоров в отдельной активной зоне, однако существенно меньше детерминированных значений. Основной вклад в коэффициент увеличения вносят твэлы периферийных рядов, по существу только один крайний ряд (см. рис. 3, б).

Максимальное энерговыделение твэлов при увеличении зазоров, отнесенное к невозмущенному варианту, в зависимости от степени искривления ТВС ВВЭР-1000

L, %	Зазор, мм							
	малый		средний		большой		гипотетический	
	4		7,9		10		21	
	Максимально возможное (детерминированное) энерговыделение в твэле для ТВС с увеличенными зазорами, отн. ед.							
	Один зазор увеличен	Два смежных зазора	Один зазор увеличен	Два смежных зазора	Один зазор увеличен	Два смежных зазора	Один зазор увеличен	Два смежных зазора
	1,059	1,085	1,176	1,261	1,238	1,362	1,57	1,95
	K _{ср} по всем активным зонам, отн. ед.							
0,1	1		1		1,01		1,03	
0,01	1,01		1,03		1,08		1,12	
0,001	1,03		1,06		1,12		1,19	
0,0001	1,05		1,09		1,17		1,26	
	K по отдельным активным зонам, отн. ед. (для 95% зон)							
0,1	1		1		1,03		1,06	
0,01	1,02		1,05		1,1		1,18	
0	1,05		1,09		1,14		1,23	
	K по отдельным активным зонам по двум группам твэлов, отн. ед. (для 95% зон)							
	По внут- ренним твэлам	По двум перифе- рийным рядам	По внут- ренним твэлам	По двум перифе- рийным рядам	По внут- ренним твэлам	По двум перифе- рийным рядам	По внут- ренним твэлам	По двум перифе- рийным рядам
0,1	1	1,01	1	1,03	1	1,07	1	1,11
0,01	1	1,04	1	1,07	1	1,12	1	1,2
0	1	1,05	1	1,09	1	1,14	1	1,23

Рис. 5 иллюстрирует, в частности, что число твэлов с относительным энерговыделением более 1,1 в каждой активной зоне не превысит 0% с 55, 0,01% с 95 и 0,1% с 100%-ной вероятностью. В 5% активных зон 0,01–0,1% твэлов превысит относительное энерговыделение 1,06 (и 1,1), но условия их охлаждения благоприятны, поскольку они располагаются вблизи увеличенных водных зазоров. Исходя из этого коэффициент запаса мощности твэла на искривление ТВС с реализацией зазора до 10 мм можно принимать равным 1,1. Как показано на рис. 5, имеется 95%-ная вероятность того, что в активной зоне не будет твэлов энерговыделением более 1,15.

Таким образом, определяемый вероятностным способом запас в мощности твэла, доминирующий вклад в который вносит только один периферийный ряд, позволяет обосновать безопасность активной зоны с большими возмущениями в отличие от детерминированного способа «максимальные зазоры возле наиболее энергонапряженного твэла». Рассмотрено влияние только зазоров как эксплуатационной неопределенности на мощность твэлов. Вместе с тем коэффициент увеличения энерговыделения целесообразно анализировать в статистической совокупности с другими факторами, которые входят в инженерный коэффициент запаса, учитывающий технологические и эксплуатационные неопределенности, а также расчетные погрешности.

В заключение автор выражает признательность В.И. Абрамову и А.М. Павловичу, с которыми обсуждались отдельные вопросы, затронутые в настоящей статье.

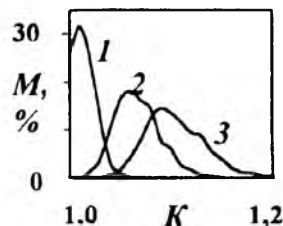


Рис. 5. Распределение активных зон по мощности твэлов: 1–3 — 0,1, 0,001 и 0% твэлов с относительной мощностью, превышающей коэффициент увеличения энерговыделения

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гомин Е.А., Гуревич М.И., Майоров Л.В., Марин С.В. Аннотация программы MCU-RFFI. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1995, вып. 3, с. 48–53.
2. Новиков А.Н., Пшенин В.В., Лизоркин М.П. и др. Система программ физрасчетов и некоторые вопросы совершенствования топливных циклов ВВЭР. — Там же, 1992, вып. 1, с. 3–9.
3. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций ПБЯ РУ АС-89, ПНАЭ Г-1-024-90.

Поступила в Редакцию 11.06.99

УДК 621.039.31

ИДЕАЛЬНАЯ ЦЕНТРИФУГА

Александров О.Е. (Уральский государственный технический университет)

Разработка эффективных разделительных газовых центрифуг требует точной оценки резервов производительности. Эффективность обычно выражается в единицах разделительной мощности

$$\delta U = PV(N_P) + WV(N_W) - FV(N_F),$$

где F , P , W — поток питания, отбора и отвала соответственно; N_F , N_P , N_W — концентрация в потоках питания, отбора и отвала; V — функция ценности

$$V(N) = (2N - 1) \ln N / (1 - N).$$

Разделительная мощность может быть увеличена двумя путями:

разработкой новых центрифуг с повышением частоты вращения, радиуса или длины ротора;