

создаются благоприятные условия для накопления шлама продуктов коррозии. Во избежание развития подшламовой коррозии следует ограничить содержание Си-ионов в воде. В расширительных баках этих контуров, коррозия конструкционных материалов которых значительна и имеет местный характер, необходима разработка мер по защите поверхностей этих баков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Седов В. М. «Атомная энергия», 1979, т. 47, вып. 5, с. 294.

2. Седов В. М. и др. «Атомная энергия», 1979, т. 46, вып. 1, с. 23.
3. Крутиков П. Г. и др. «Теплоэнергетика», 1978, № 6, с. 13.
4. Лабораторные работы по коррозии и защите металлов. М., «Металлургия», 1971.
5. Седов В. М. и др. «Атомная энергия», 1979, т. 47, вып. 5, с. 340.
6. Морозова И. К. и др. Вынос отложения продуктов коррозии реакторных материалов. М., Атомиздат, 1975.
7. Герасимов В. В., Касперович А. И., Мартынова О. И. Водный режим атомных электростанций. М., Атомиздат, 1976.

Поступила в Редакцию 19.03.80

УДК 621.039.59.00271,68

Основные принципы обеспечения ядерной безопасности в проектах транспортных упаковочных комплектов

ИЛЬИН В. П., КОНДРАТЬЕВ А. Н., ЛЕБЕДЕНКО С. Г.

Проблемы транспортирования отработавшего ядерного топлива АЭС связаны с решением комплекса вопросов обеспечения ядерной безопасности. Принимаемые в настоящее время при перевозке этого топлива специальные меры обеспечивают сравнительно низкую вероятность транспортных аварий, которые могут привести к повреждению транспортных упаковок. По оценкам зарубежных экспертов, вероятность аварии на железнодорожном транспорте (на милю) составляет от $0,8 \times 10^{-6}$ до $2,5 \cdot 10^{-6}$. При этом вероятность повреждения контейнеров (на аварию) $1,6 \cdot 10^{-5} - 9,5 \cdot 10^{-2}$ [1]. Однако при резком увеличении перевозок, которое следует ожидать в ближайшие годы, число аварий может возрасти. Поэтому при создании новых конструкций транспортных упаковочных комплектов требуется более строгий анализ их ядерной безопасности.

В настоящее время утверждены и введены в действие «Правила ядерной безопасности при транспортировании отработавшего ядерного топлива» (ПВЯ-06-08-77), в которых изложены общие принципы и основные требования по обеспечению ядерной безопасности при проектировании и эксплуатации транспортных упаковочных комплектов. При разработке конструкции упаковочного комплекта необходимо оценивать ядерную безопасность на всех стадиях проектирования, а также учитывать как нормальные, так и аварийные условия транспортирования. Для обеспечения ядерной безопасности с достаточным запасом для каждой отдельной упаковки должно выполняться одно из следующих ограничений:

— масса делящихся материалов не должна превышать 80% критической массы системы, подобной рассматриваемой;

— эффективный коэффициент размножения нейтронов $k_{эф}$ не должен превышать 0,95 [2].

При расчете критических параметров необходимо учитывать геометрию и пространственное распределение делящихся и неделящихся материалов в упаковке, их ядерно-физические свойства, состав топливной композиции с учетом выгорания, наличие отражателей и поглотителей. Обеспечение ядерной безопасности при транспортировании отработавшего ядерного топлива в нормальных условиях достигается путем симметричного размещения ТВС в транспортном упаковочном комплекте с равномерным шагом, при котором $k_{эф} = 0,95$. Для перевозки отработавшего топлива ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 используются упаковки ТК-6 и ТК-10 соответственно (в табл. 1 характеристики по первому варианту конструкции упаковок). При анализе ядерной безопасности следует также учитывать условия хранения отработавшего ядерного топлива. Если оно находится в бассейне выдержки в тех же транспортных чехлах, то оценивать ядерную безопасность необходимо с учетом условий безопасного хранения, так как происходит нейтронное взаимодействие между соседними чехлами.

Определенные трудности возникают на ранних стадиях разработки конструкции, когда необходимо выполнить предварительный анализ ядерной безопасности для предъявления требований к прочности упаковки, т. е. упаковочного комплекта, загруженного ТВС, и к обеспечению сохранности ее содержимого. В этом случае исходными данными для физических расчетов могут служить результаты обобщения опыта транспортирования топлива, анализа аварийных ситуаций и предшествующих испытаний, имитирующих условия аварии, выполненных на моделях или на натуральных образцах,

Таблица 1

Основные характеристики упаковки [3, 4]

Тип упаковки	Форма контейнеров	Размеры, см	Толщина защиты из стали, см	Масса топлива (UO ₂), т	Число ТВС	Расположение сборок	k _{эф} *
ТК-6	Вертикальный цилиндр	Диаметр 230, высота 440	36	3,6	30	С шагом 22,5 см в треугольной решетке	0,884; 0,756
ТК-10	Горизонтальный цилиндр	Диаметр 210, длина 610	39,5	3,0	6	По окружности, расстояние между центрами сборок 40 см	0,845; 0,658

* Первое число — для свежего топлива, второе — для отработавшего.

Таблица 2

Классификация механических повреждений

Характер повреждений	Последствия повреждений, представляющие опасность	Параметры, учитываемые при анализе ядерной безопасности
Разуплотнение контейнера	Попадание воды в упаковку, если наличие воды не предусматривалось в конструкции	Коэффициент размножения нейтронов в образовавшейся системе
Раздавливание контейнера Относительные перемещения ТВС	Потеря теплоносителя, если повреждение приводит к расплавлению топлива Потеря содержимого Образование компактных групп ТВС Уменьшение расстояния между ТВС, равномерное или неравномерное уменьшение шага решетки	Случай исключается (ПБЯ-06-08—77) Случай недопустим (ПБЯ-06-08—77) Минимальное число ТВС, образующих критическую систему Максимально допустимое равномерное уменьшение шага решетки
Разрушение ТВС и твэлов	Заполнение обломками твэлов и ТВС полости контейнера Выход топлива и твэлов и заполнение кусками топлива в смеси с теплоносителем полости контейнера	Неравномерные перемещения ТВС, создающие критические системы Критическая масса системы, образованной обломками твэлов, в оптимальной упаковке и с оптимальным отражателем Критическая масса системы, образованной смесью кусков топлива и теплоносителя оптимальной формы и плотности с оптимальным отражателем

а также результаты прочностных расчетов, устанавливающие характер и размеры возможных повреждений упаковки.

Эта информация, возможно, не даст достаточно статистического материала для количественной оценки механических повреждений, однако полученные данные позволяют составить качественную картину последствий аварийных повреждений. Было установлено [5], что многообразие возможных повреждений упаковок, тем или иным образом влияющих на изменение реактивности системы, может быть представлено как комбинация ограниченного числа видов нарушений в конструкции, каждое из которых имеет свои особенности при анализе ядерной безопасности и характеризуется своими критическими параметрами. С учетом этих положений была предложена классификация ме-

ханических повреждений и их последствий, которые целесообразно рассматривать при анализе ядерной безопасности (табл. 2). В графе 3 указано, какие критические параметры принимаются во внимание при анализе опасности соответствующего повреждения.

На основе выполненных расчетов устанавливаются допустимые повреждения, при которых упаковка будет ядерно-безопасной. Затем формулируются требования к конструкции упаковочного комплекта по ограничению повреждений в допустимых пределах. Порядок проведения предварительного анализа ядерной безопасности конструкции транспортных упаковочных комплектов был апробирован при создании агрегата ТК-6 и разработке требований к агрегату ТК-10 (табл. 3). На основе этих данных были определены требова-

Результаты предварительной оценки ядерной безопасности агрегатов ТК-6 и ТК-10 в аварийных условиях

Характер повреждения	Последствия повреждений	Определяемый параметр	Вид перевозимого топлива	Значения определяемых параметров			
				опасные		допустимые	
				ТК-6	ТК-10	ТК-6	ТК-10
Относительные перемещения ТВС	Образование компактных групп	Минимальное число ТВС (твэлов), образующих критическую систему	Свежее	6 ТВС *	675 твэлов 936 твэлов	4 ТВС 30 ТВС *	540 твэлов 750 твэлов
	Равномерное уменьшение шага решетки ТВС	Максимально допустимое уменьшение шага решетки	Свежее	Более 10 мм	Более 10 мм	10 мм *	1,5 кг
Разрушение ТВС и твэлов	Образование опасной системы из двуокиси урана и воды	Критическая масса сферы из двуокиси урана и воды	Отработавшее	2,1 кг ** ²³⁵ U	1,9 кг ²³⁵ U	1,7 кг ²³⁵ U	²³⁵ U
	Образование опасной системы из обломков твэлов и ТВС	Критическая масса системы	То же	5 кг U + Pu Обломки 20 ТВС	Обломки 1,5 ТВС	4 кг U + Pu Обломки 16 ТВС	Обломки 1,2 ТВС

* Данные получены в ИАЭ им. Курчатова.
** Данные получены в отделе ядерной безопасности ФЭИ.

ния к конструкциям упаковочных комплектов этих агрегатов. Полученные результаты позволили сделать вывод, что в упаковках агрегатов ТК-6 и ТК-10 с точки зрения ядерной безопасности допустимы существенные повреждения, приводящие к перемещению десятков (при высыпании топлива из твэлов) или сотен (при отсутствии высыпания) килограммов топлива.

Результаты работы по проведению предварительного анализа ядерной безопасности проектируемых транспортных упаковочных комплектов обсуждались на совещании специалистов по проблеме транспортирования ядерного топлива стран-членов СЭВ в Ленинграде в 1978 г.

Выводы. Любая конструкция транспортных упаковочных комплектов, предназначенных для перевозки отработавшего ядерного топлива, должна отвечать требованиям ПБЯ-06-08—77 и иметь представительные доказательства ядерной безопасности. Предложенная классификация повреждений устанавливает целесообразную последовательность расчета критических параметров системы при выполнении предварительного анализа ядерной безопасности упаковочных комплектов на

ранней стадии их проектирования. После предварительного анализа ядерной безопасности упаковок агрегатов ТК-6 и ТК-10 установлены допустимые значительные аварийные повреждения, приводящие к перемещению топлива внутри упаковки, что создает реальную возможность для технического обеспечения ядерной безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Russel J. An Evaluation of Risk Models for Radiative Material Shipments. In: Proc. 4th Intern. Symp. of Packaging and Transportation of Radiative Materials. Miami Beach, Florida, 22—27 Sept. 1974.
2. Правила ядерной безопасности при транспортировании отработавшего ядерного топлива (ПБЯ-06-08—77). Госатомнадзор СССР.
3. Андреев П. А. и др. В кн.: Труды ЦКТИ, 1977, вып. 142, с. 10.
4. Внуков В. С., Диев Л. В., Прохоров Ю. А. Вопросы ядерной безопасности при транспортировании отработавшего топлива в упаковках ТК-6 и ТК-10. Докл. совещания специалистов стран — членов СЭВ по транспортированию отработавших твэлов. Л., 1979, с. 97.
5. Ильин В. П., Лебеденко С. Г. Предварительный анализ ядерной безопасности транспортных упаковок. Там же, с. 87.

Поступила в Редакцию 13.08.79