Таблица 2. Максимальные и допустимые усилия в сечениях МБК при падениях ТУК с высоты 9м

Угол падения к вертикали	Максимальные усилия		Допустимые усилия	
			Без ослабления сечения	С ослаблением сечения
	$N \cdot 10^{-3}$кН	$M \cdot 10^{-3}$кН • м	$M_{npl}(N) \cdot 10^{-3}$кН • м	$M_{npll}(N) \cdot 10^{-3}$кН • м
0	0.09	36.67	100.8	97.5
15	0.19	22.24	100.9	97.5
30	15.53	15.13	105.8	101.7
45	36.88	12.79	109.7	104.0
65	37.31	8.95	109.8	104.0
90	85.7	-	302 кН *)	277.3 кН *)
Примечание - *) приведены допустимые усилия при сжатии				

Результаты проведенных дополнительных к техническому проекту исследований, выполненных с целью обеспечения многоразовой перевозки ТУК-109 с ОЯТ РБМК-1000 железнодорожным транспортом, показали, что воздействие как циклических тепловых, так и транспортных нагрузок не приводит к образованию трещин в бетонном массиве корпуса контейнера и к снижению несущей способности МБК, в том числе и при последующих аварийных ситуациях при перевозках (падение с высоты 9 м).

Проведенный анализ показал, что даже при гипотетической ситуации, связанной с образованием трещин в наружном слое бетонного массива МБК, прочность и радиационная защита МБК ТУК-109 гарантированно обеспечиваются.

Транспортирование ТУК-109 с ОЯТ РБМК-1000 можно осуществлять без какого-либо ограничения по числу перевозок.

Литература

1. СНиП 2.03.01-84. Бетонные железобетонные конструкции.
2. ТУ 5870-003-07805066-98. Технические условия. Бетон особо прочный сверхтяжелый, второе издание, дополненное.
3. СНиП II-11-77. Защитные сооружения гражданской обороны.
4. Комплект транспортный упаковочный для хранения и транспортирования ОЯТ АЭС с реакторами РБМК-ЮОО. Технический проект. Расчет прочности. Часть первая. Расчет на прочность МБК. ТУК-109 Р14, КБСМ, 1999.
5. Комплект транспортный упаковочный для хранения и транспортирования ОЯТ АЭС с реакторами РБМК-1000. Технический проект. Расчет внешних нагрузок. ТУК-109 РОЗ, КБСМ, 1999
6. Инструкция по перевозке негабаритных и тяжеловесных грузов на железных дорогах ..., выпуск 4. Совет по железнодорожному транспорту государств – участников СНГ. СПб, 2002.
7. Каранфилов Т.С., Волков Ю.С. Работа железобетонных конструкций на многократную повторную нагрузку. Сборник статей «Применение железобетона в машиностроении». Машиностроение. МЛ964.
8. Комплект транспортный упаковочный для хранения и транспортирования ОЯТ АЭС с реакторами РБМК-1000. Технический проект. Расчет тепловой. ТУК-109 Р17.КБСМ.1999.
9. СНиП 2.03.04-84. Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур.
10. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.
11. Сейсмическая прочность материалов конструкций АЭС. Обзорная информация. Серия. Атомные станции, выпуск 4. Информэнерго.М.1991.

РЕАЛИЗАЦИЯ ПИЛОТНОГО ПРОЕКТА ПО ПЕРЕВОЗКЕ И ПЕРЕРАБОТКЕ ОПЫТНОЙ ПАРТИИ НЕКОНДИЦИОННЫХ ОТВС РЕАКТОРА РБМК НА ФГУП «ПО «МАЯК» И ПОИСК СОГЛАСОВАННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ РЕГУЛЯРНЫХ ПЕРЕВОЗОК НЕКОНДИЦИОННОГО ОЯТ

Канашов Б.А., Дорофеев А.Н., Смирнов В.П.
ООО НПФ «Сосны», Димитровград

Хаперская А.В., Кудрявцев Е.Г.
ГК «Росатом», Москва

Баранов С.В., Колупаев Д.Н.
ФГУП «ПО «Маяк», Озерск

Калязин Н.Н., Ложников И.Н.
Ленинградская АЭС им. В.И.Ленина, Сосновый Бор

Введение

В течение длительного времени среди специалистов существовало достаточно устойчивое мнение о том, что переработка ОЯТ РБМК нецелесообразна. И на то были серьезные основания: исходное обогащение топлива по урану-235 имело низкие значения (максимум 2%), а цены на уран были невысоки, при этом другие источники урана покрывали текущие потребности в нем. С тех пор ситуация изменилась: в настоящее время используется топливо с обогащением по урану-235 до 2,8%, а цены на уран возросли в несколько раз. Чтобы предоставить необходимые данные для разрешения спора о целесообразности переработки ОЯТ РБМК и подтвердить принципиальную возможность перевозки и переработки, 14 января 2011 г. по инициативе ГК «Росатом» руководство ОАО «Концерн Росэнергоатом» приняло решение о реализации пилотного проекта по вывозу пучков твэлов (ПТ) некондиционных ОТВС с энергоблока №2 Ленинградской АЭС на ФГУП «ПО «Маяк».

Кроме того, существовала еще одна серьезная причина, по которой был предпринят данный проект. В отличие от кондиционного ОЯТ РБМК, которое в соответствии с концепцией ГК «Росатом» должно быть переведено в режим длительного «сухого» хранения (контейнерного или шахтного), судьба некондицион-

ного ОЯТ РБМК до сих пор законодательно не определена. Чтобы принять решение относительно перевозки и переработки некондиционного ОЯТ РБМК на регулярной основе, требовалось представить достаточно веские основания.

С практической точки зрения для реализации пилотного проекта необходимо было решить несколько технических задач:

- выбор ОТВС для опытной партии;
- выбор контейнера и разработка компонентов упаковки для перевозки опытной партии некондиционных (в первую очередь, негерметичных) ОТВС;
- разработка технологии и оборудования для разделки ОТВС и загрузки ПТ в контейнер на Ленинградской АЭС;
- разработка технологии и оборудования для обращения с ПТ на ФГУП «ПО «Маяк».

Кроме того, необходимо было решить научные задачи, связанные с обоснованием безопасности обращения с некондиционным ОЯТ и получить соответствующие разрешительные документы. В течение 2011 года эти задачи были успешно решены, и в период 15–19 ноября 2011 г. была осуществлена перевозка опытной партии некондиционных ОТВС РБМК Ленинградской АЭС, а в конце этого же месяца – ее переработка на ФГУП «ПО «Маяк».

Выбор ОТВС опытной партии

К некондиционному ОЯТ реакторов РБМК относятся ОТВС, непригодные для длительного «сухого» хранения. В своем большинстве некондиционное ОЯТ РБМК – это досрочно выгруженные и не достигшие проектного выгорания ОТВС, содержащие достаточно высокий процент урана-235. К этому же типу относятся ОТВС, получившие повреждения в процессе транспортно-технологических операций после извлечения из АЗ. Однако для пилотного проекта был выбран наихудший тип некондиционных ОТВС – негерметичные. Все ОТВС, отобранные для опытной партии, были выгружены из АЗ по критерию негерметичности. Кроме того, по результатам настойных тестов активность ^{137}Cs в воде пенала превышала 10^{-4} Ku/л, что свидетельствовало о наличии контакта топливных таблеток с водой и, соответственно, наличии воды под оболочкой хотя бы одного твэла.

Конструкция отобранных ОТВС – штатная, с закреплением твэлов в ПТ в концевых решетках на концах ОТВС. Во всех отобранных ОТВС обогащение топлива по урану-235 составило 2,4% – наиболее типичное значение обогащения для большинства ТВС РБМК-1000. Выгорание топлива находилось в пределах от 7,8 до 20,5 МВт·сут/кгU, т.е. меньше, чем проектное (21,8 МВт·сут/кгU) для выбранного исходного обогащения. Время выдержки (13,8–16,5 лет) выбиралось из соображений радиационной безопасности.

Количество ОТВС (8 ОТВС, 16 ПТ) выбиралось исходя из необходимости обеспечить однократную загрузку аппарата-растворителя на перерабатывающем заводе ФГУП «ПО «Маяк».

С целью подготовки исходных данных для обоснования безопасности перевозки и анализа целесообразности дальнейшего использования регенерированного урана из ОЯТ РБМК-1000 были выполнены расчеты нуклидного состава и активности источников альфа-, бета- и гамма- и нейтронного излучения, включая вклад нейтронов за счет (α, n) и (γ, n)-реакций. Особое внимание уделялось четным изотопам ^{232}U и ^{236}U, которые оказывают влияние на качество регенерата.

Выбор контейнера и разработка компонентов упаковки

Было бы логичным для пилотного проекта выбрать контейнер и транспортно-технологическую схему, которые можно было использовать в дальнейшем для регулярных перевозок некондиционного ОЯТ РБМК, например, выбрать ТУК-109 с подготовкой ОТВС в отделении разделки хранилища ОЯТ. Однако на момент реализации пилотного проекта:

- ни на одной АЭС с реакторами РБМК отделения разделки не были пущены в эксплуатацию. Даже в случае запуска отделения разделки оно должно было, в первую очередь, выполнять свою основную функцию освобождения ХОЯТ от кондиционных ОТВС;
- транспортно-технологическая структура ФГУП «ПО «Маяк» была не приспособлена для обращения с современными ТУК типа ТУК-109.

Поэтому для пилотного проекта был выбран вариант, предусматривающий использование хорошо зарекомендовавшего себя ТУК-11 с чехлом 12 и разделку ОТВС в защитной камере 2-го энергоблока Ленинградской АЭС. Дополнительным аргументом в пользу ТУК-11 стало достаточное их количество (семь ТУК-11 и 14 чехлов 12) и отлаженная технология обращения с ними на ФГУП «ПО «Маяк».

Однако следует подчеркнуть, что какой бы контейнер не был выбран, основной проблемой при транспортировании некондиционного ОЯТ является обеспечение пожаровзрывобезопасности упаковки, содержащей негерметичное неосушенное топливо, длительное время находившееся в воде. Если проблема осушения герметичного топлива в настоящее время решена, то удаление воды из негерметичных твэлов по-прежнему является сложной технической задачей.

В связи с изложенным было принято решение о перевозке ПТ некондиционных ОТВС в герметичных тонкостенных ампулах, конструкция которых позволяла бы перерабатывать ПТ на радиохимическом заводе вместе с ампулой. К ампуле также предъявлялись требования по прочности в нормальных и аварийных условиях при транспортировании и обращении на АЭС и ФГУП «ПО «Маяк». На рис. 1 представлена конструкция ампулы для перевозки ПТ некондиционных ОТВС РБМК в ТУК-11.

Разработанная ампула предназначена как для транспортирования ПТ некондиционных ОТВС РБМК в составе транспортного упаковочного комплекта ТУК-11, так и для временного технологического хранения в бассейне-хранилище ФГУП ПО «Маяк». Конструкция ампулы разработана в соответствии с требованиями НП-053-04 [1], НП-001-97 (ОПБ - 88/97) [2], НП-016-05 (ОПБ ОЯТЦ) [3]. Класс безопасности ампулы по НП-001-97 – 3Н, по НП-016-05 – 3Н.

Расчеты и проведенные в ГНЦ НИИАР эксперименты показали, что пожаро- и взрывоопасная концентрация водорода не образуется в объеме герметичных ампул (при их заполнении воздухом при атмосферном давлении без продувки инертными газами) в течение как минимум 9 месяцев при условии размещения в ампуле одного негерметичного твэла, заполненного водой, и в течение 5 месяцев, если в ампуле находятся два негерметичных твэла. В объеме ТУК-11 пожаро- и взрывоо-

пасная концентрация кислорода и водорода не образуется при любом времени нахождения в нем ОЯТ.

Ампулы с ПТ в процессе транспортирования размещались в модернизированном чехле 12, содержащем специальные вкладыши, которые обеспечивали дополнительную прочность конструкции упаковки и снижали вероятность повреждения ампул в процессе транспортирования. Для обеспечения радиационной безопасности в процессе установки крышки на контейнер на территории АЭС и снятия крышки с контейнера на ФГУП «ПО «Маяк» использовалась внутренняя перегрузочная плита, которая являлась частью упаковки. При разработке упаковки наибольшие проблемы создавало ограниченное пространство внутри контейнера. Поэтому, в частности, грибок внутренней перегрузочной плиты при установке крышки контейнера «утапливался» в корпус плиты, а при снятии крышки – выдвигался. Конструкция упаковки ТУК-11Р-2 представлена на рис. 2.

Рис. 1. Ампула для перевозки негерметичных ОТВС реактора РБМК

Рис. 2. Упаковка ТУК-11Р-2 для перевозки негерметичных ОТВС реактора РБМК

Результаты численных расчетов по определению напряженно-деформированного состояния и оценке прочности транспортного упаковочного комплекта ТУК-11Р-2, загруженного 16-ю ампулами с ПТ некондиционных ОТВС РБМК-1000, при воздействии механических нагрузок, моделирующих нормальные и аварийные условия перевозки, показали, что упаковка удовлетворяет всем требованиям российских правил НП-053-04. В частности, были сделаны выводы о том, что:

- *в нормальных условиях* перевозки конструкция ТУК-11Р-2, включая болты крепления крышки к корпусу контейнера, деформируется в упругой области и сохраняет свою прочность и герметичность; конструкция ампул деформируется, в основном, в упругой области; ампулы сохраняют свою прочность и герметичность; сохраняется возможность свободного извлечения чехла и внутренней перегрузочной плиты из полости контейнера, а также извлечения вкладышей из гнезд чехла и ампул из вкладышей;
- *в аварийных ситуациях* конструкция ТУК-11Р-2 деформируется, в основном, в упругой области и сохраняет свою прочность; болты крепления крышки к корпусу контейнера деформируются, в основном, в упругой области; при этом все болты сохраняют свою прочность; уровень деформаций не приводит к нарушению целостности корпуса ампулы и байонетного соединения; сохраняется возможность свободного извлечения чехла и внутренней перегрузочной плиты из полости контейнера, а также свободное извлечение вкладышей и ампул из гнезд чехла, но извлечение ампул из вкладышей может быть затруднено.

Технология разделки ОТВС

Разделка ОТВС на пучки твэлов производилась с помощью фрезерного станка в защитной камере энергоблока 2 Ленинградской АЭС. Там же производилась загрузка ПТ в ампулы и герметизация ампул специальной крышкой. Для обеспечения радиационной безопасности в процессе перемещения и загрузки ампулы с ПТ в контейнер на крышку ампулы устанавливались защит-

ная пробка и грибок (рис. 3), верхняя часть которого совместима с захватными механизмами, используемыми в реакторном зале энергоблока.

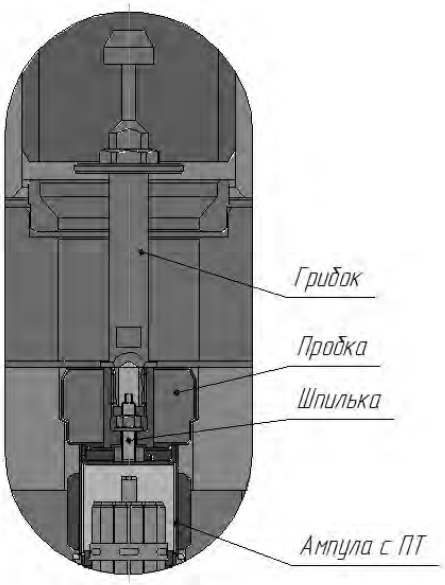

Рис. 3. Ампула с ПТ в сборе с защитной пробкой и грибком

Технология загрузки ампул с ПТ в ТУК-11Р-2 на АЭС

Из всех возможных способов загрузки ОЯТ в ТУК-11 была выбрана технология с использованием перегрузочного контейнера. В качестве перегрузочного контейнера использовалось транспортное устройство (ТрУ), которое применяется для перемещения ОТВС в пределах реакторного зала энергоблока. В процессе подготовки к загрузке ампул с ПТ в ТУК-11 были решены следующие задачи:

- разработка перецепочного узла для стыковки ТрУ с пробкой защитной камеры и выгрузки ампулы с ПТ из защитной камеры в ТрУ (рис.4);
- разработка переходного узла и наружной перегрузочной плиты для стыковки ТрУ с ТУК-11Р-2 и перегрузки ампулы с ПТ из ТрУ в контейнер (рис.5).

Разработанные компоненты упаковки для перевозки опытной партии ПТ ОТВС РБМК в ТУК-11 и вспомогательное оборудование удовлетворяют требованиям российских правил НП-070-06 [4] и относятся к группе 3 оборудования. По ПНАЭГ-7-008-89 [5] компоненты упаковки для перевозки опытной партии ПТ ОТВС РБМК в ТУК-11 и вспомогательное оборудование относятся к группе оборудования С.

Технология обращения с ампулами с ПТ на ФГУП «ПО «Маяк»

Приемка контейнера ТУК-11Р-2 на ФГУП «ПО «Маяк» осуществлялась по штатной схеме. Вагон-контейнер ТК-11 по железнодорожным путям доставлялся в здание приемки ОЯТ, где вагон подключался к системам энергоснабжения. После раскрытия створок крыши ТК-11 и снятия крышки контейнера извлекалась внутренняя перегрузочная плита и чехол с ампулами перемещался в бассейн-хранилище.

Поскольку ампулы были герметичными, исключалась утечка ПД в воду бассейна-хранилища из негерметичных твэлов. Необходимо отметить, что суммарные темпы выхода ПД из всех негерметичных твэлов в наихудшем случае составляли не более 25% от производительности системы очистки воды бассейна-хранилища,

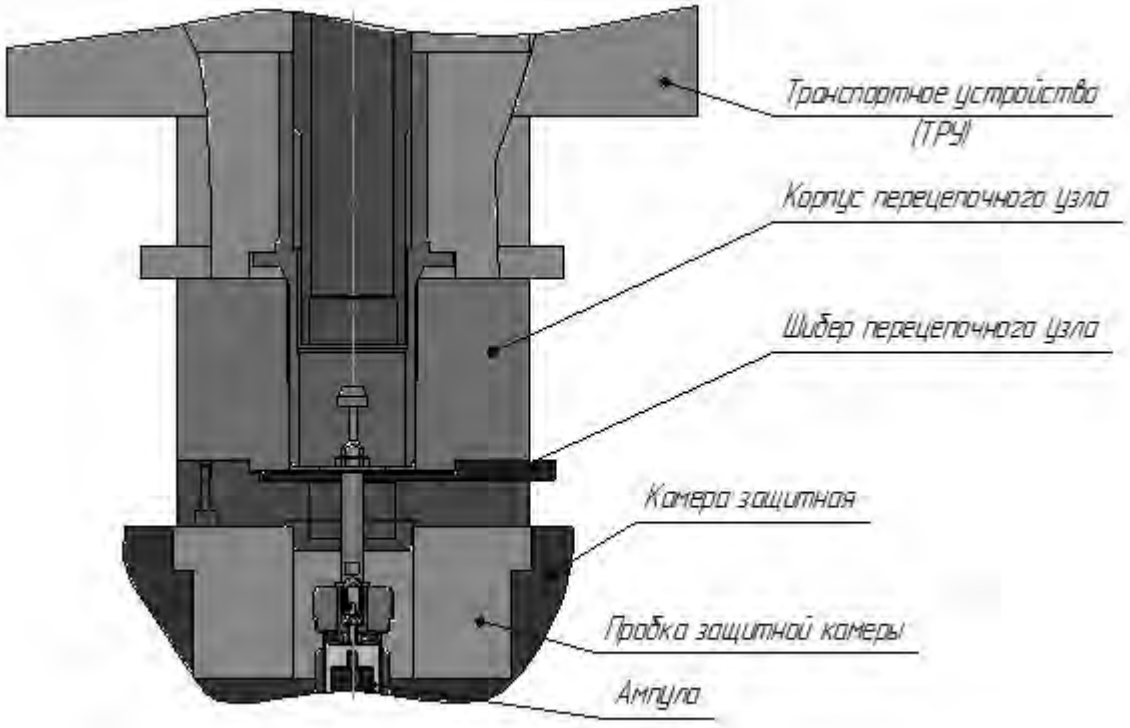

Рис. 4. Перецепочный узел для стыковки ТрУ с пробкой защитной камеры

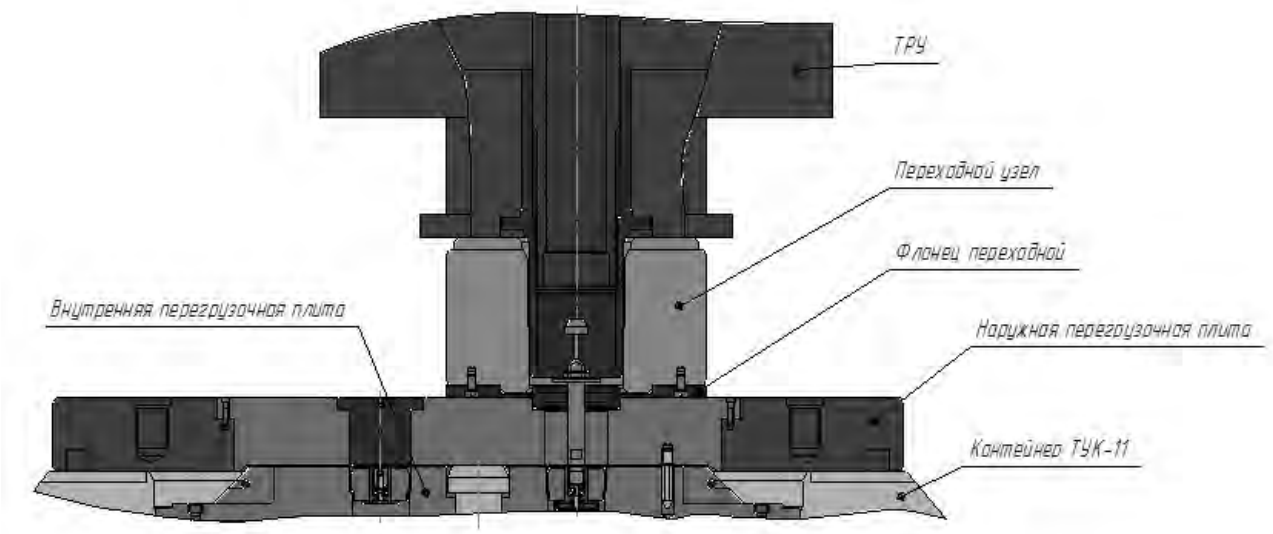

Рис. 5. Переходной узел и наружная перегрузочная плита для стыковки ТрУ с ТУК-11Р-2

и с этой точки зрения ампулы с ПТ могли быть и негерметичными. Тем не менее, конструкция ампул была выбрана герметичной, поскольку правила перевозки для нормальных условий и аварийных ситуаций однозначно требуют наличия в процессе транспортирования двух барьеров безопасности.

Для передачи чехла с ампулами с ПТ в защитную камеру и для извлечения их из чехла был разработан специальный инструмент (переходники, захваты и т.п.), адаптированный к штатному оборудованию защитной камеры. После выполнения указанных операций ампула с ПТ помещалась на ложемент агрегата резки, который разделывал ампулы на фрагменты, пригодные для дальнейшей переработки ОЯТ по технологии, аналогичной технологии переработки ОЯТ реакторов ВВЭР.

Заключение

Реализация пилотного проекта показала техническую осуществимость разделки негерметичных ОТВС РБМК в защитных сооружениях Ленинградской АЭС, вывоза в адаптированных контейнерах ТУК-11Р-2, возможность переработки ОЯТ РБМК по существующей технологической схеме ФГУП «ПО «Маяк» с получением конечного товарного продукта в виде 1%-ного плава уранилнитрата требуемого качества.

Вместе с тем на основе опыта реализации пилотного проекта были разработаны подходы для организации регулярных перевозок некондиционного ОЯТ на ФГУП «ПО «Маяк»:

- Массовый вывоз некондиционного ОЯТ РБМК на регулярной основе с российских АЭС в объемах, достаточных для загрузки перерабатывающих мощностей ФГУП «ПО «Маяк», возможен только через отделения разделки пристанционных ХОЯТ. Вывоз ОЯТ через энергоблоки технически возможен, может применяться при необходимости, но более целесообразен после останова энергоблока, например для вывоза сильно поврежденного ОЯТ.
- Для вывоза некондиционного ОЯТ РБМК на регулярной основе следует применять современные контейнеры, обладающие широким диапазоном возможностей с точки зрения обогащения топлива, выгорания и времени выдержки (типа ТУК-109 и ТУК-109Т). Надежные и простые в обращении ТУК-11 целесообразно использовать для решения частных задач.
- Безопасность перевозки некондиционного (в том числе и негерметичного) ОЯТ РБМК может быть обеспечена при использовании невозвратных герметичных ампул, которые будут перерабатываться вместе с ПТ. В этом случае эксплуатационные затраты будут достаточно высоки.
- Для снижения эксплуатационных затрат можно использовать возвратные герметичные ампулы, однако технология обращения с ними будет сложнее и капитальные затраты для обеспечения того же уровня безопасности будут выше.

Список литературы

1. Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов: НП-053-04. – Взамен ПБТРВ-73 и ОПБЗ-83: утв. Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору 04.10.2004: введ. 01.05.2005 – М., 2005. – 105 с.

2. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций: ОПБ-88/97. НП-001-97 (ПНАЭ Г-01-011-97): утв. Госатомнадзором России 14.11.1997: ввод. в д. с 01.07.98 – М., 1998. – 24 с.

3. Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла (ОПБ ОЯТЦ): НП-016-05. – Взамен НП-016-2000: утв. Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору 2.12.2005: введ. 01.05.2006. – М., 2006.

4. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов объектов ядерного топливного цикла: НП-070-06. – утв. Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору 05.09.2006: введ. 01.12.2006. – М., 2006.

5. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок: ПНАЭ Г-7-008-89 (с изменениями № 1 от 01.09.2000). – утв. Госатомнадзором России 01.01.1990: введ. 01.01.1990. – М., 2003.