

РАЗРАБОТКА ТРАНСПОРТНОГО УПАКОВОЧНОГО КОМПЛЕКТА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ БЕЗОПАСНОГО ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ОТРАБОТАВШИХ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК РЕАКТОРОВ ТИПА ВВЭР-1000/1200

Д. Ю. Смирнов, М. А. Наумов, Е. Е. Маслов, Д. В. Шошин, В. И. Романов, С. В. Баканова

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Расширение использования атомной энергии в народном хозяйстве России и за рубежом обостряет проблему отработавшего ядерного топлива и радиоактивных отходов. Сложившаяся инфраструктура обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) уже в настоящее время не в полной мере удовлетворяет потребность в размещении ОЯТ [1].

Тепловыделяющие сборки на АЭС после отработки помещаются на временное хранение в бассейн выдержки (БВ), после чего их доставляют на специальные предприятия переработки и хранения ОЯТ. Для перевозки ОЯТ используют транспортные упаковочные комплекты (ТУК). Актуальной задачей в рамках государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности является обеспечение оптимального темпа вывоза с площадок эксплуатирующих организаций, переработки и размещения на длительное хранение отработавшего ядерного топлива.

В настоящее время активно развивается направление по сооружению АЭС в России и за рубежом. Произошел переход на 18-месячный топливный цикл обращения с ОЯТ, в связи с этим изменились параметры отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС), а именно глубина выгорания, первичное обогащение. Новые АЭС оснащаются более современными реакторами ВВЭР-1200. На сегодняшний день в эксплуатации находятся ТУК-13 и ТУК-10, предназначенные для перевозки ОТВС реактора ВВЭР-1000.

Приоритетной остается задача размещения ОЯТ на хранение в ТУК и транспортировка ОТВС в ТУК на предприятия переработки в РФ. Для гарантированного обеспечения вывоза и хранения активных ОТВС существует потребность в разработке нового поколения ТУК.

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» ведет работы по созданию типового ряда ТУК-137, предназначенных для обслуживания как зарубежных АЭС, строящихся по российским проектам, так и отечественных АЭС. Разработанный и сертифицированный ТУК-137Т

соответствует современным российским и международным стандартам и может перевозить до 18 ОТВС реакторов ВВЭР-1000/1200 всех российских АЭС, что позволит существенно сократить затраты на транспортировку ОЯТ. Данный ТУК рассчитан на транспортировку ОТВС с обогащением до 5 %, глубиной выгорания до 70 ГВт.сут/т и с суммарным энерговыделением до 36 кВт, что позволит обеспечить вывоз ОЯТ не только с существующих, но и строящихся АЭС.

Цель работы

Создание современного транспортного контейнера для вывоза ОТВС реакторной установки (РУ) ВВЭР-1000/1200, отвечающего всем требованиям безопасности, с максимальной вместимостью, с возможностью эксплуатации на всех АЭС РФ, а также на ФГУП «ГХК», для перевозки на существующих транспортных средствах.

Анализ существующего парка контейнеров и выбор конструкции ТУК

К современным контейнерам предъявляются высокие требования:

- по обеспечению надежной биологической защиты от ионизирующего излучения [2];
- по исключению выхода радиоактивных продуктов в окружающую среду [4];
- по ядерной безопасности;
- по сохранению герметичности в аварийных ситуациях (пожар, падение контейнера с вагона, падение контейнера в воду и т. п.);
- по отводу тепла [4], который обеспечивается механизмом теплопроводности и естественным расхождением тепла в окружающей среде.

Основными недостатками конструкций ТУК-13 и ТУК-10 с точки зрения обеспечения безопасности является жидкая нейтронная защита и единственный контур герметизации внутреннего объема, данные контейнеры обладают малой вместимостью (см. табл. 1).

Сравнение ТУК для ОТВС РУ ВВЭР-1000

ТУК	Кол-во ОТВС, шт.	Габаритные размеры (диаметр×высота), мм	Основной материал	Тип нейтронной защиты	Кол-во контуров герметизации	Суммарное тепловыделение перевозимых ОТВС, кВт
ТУК-10	6	2600×5950	Коррозионно-стойкая сталь 12Х18Н10Т	Жидкая	1	13
ТУК-13	12	2295×5820		Жидкая	1	20
ТУК-137Д	20	2650×6260	Коррозионно-стойкая сталь 12Х18Н10Т	Твердая	2	40
ТУК-137Т	18	2410×6229		Твердая	2	36
Castor 1000	19	2330×5500 (без демпферов)	Чугун с гнездообразным графитом	Твердая	2	17,5

Устройство и работа ТУК-137Т

Конструкция ТУК-137Т разрабатывалась согласно техническому заданию (ТЗ) «Упаковочный комплект для транспортирования отработавшего ядерного топлива реакторов ВВЭР-1000/1200». Данное ТЗ согласовано АО «Концерн Росэнергоатом» (Ростовская атомная станция, Балаковская атомная станция, Калининская атомная станция, Нововоронежская атомная станция), ФГУП «ГХК», ФГУП «ПО «Маяк», АО «ЦКБ ТМ» и утвержденным директором по государственной политике в области радиоактивных отходов, отработавшего ядерного топлива и вывода из эксплуатации ядерно- и радиационно-опасных объектов Госкорпорации «Росатом» О.В. Крюковым. Контейнер выполнен в рамках продуктовой линейки и разработан на одной платформе с ТУК-109Т и ТУК-137Д. Общий вид ТУК-137Т изображен на рис. 1.

ТУК-137Т состоит из контейнера, имеющего внутреннюю полость для размещения чехла, и съёмных демпфирующих устройств – верхнего и нижнего демпферов. Защитный контейнер представляет собой силовой стальной герметичный сосуд цилиндрической формы, состоящий из корпуса, имеющего внутреннюю полость для размещения чехла, которая герметично закрыта внутренней крышкой и наружной крышкой, образующей второй контур герметизации полости контейнера. На поверхности контейнера имеется две накладки, предназначенные для установки ТУК-137Т в горизонтальном положении на ложементы ж/д транспортера ТК-У-1410.

Корпус состоит из нижнего комингса, выполненного в виде кольца из нержавеющей стали, силового днища из низколегированной стали, сваренного в комингс, отсека нейтронной защиты, заполненного полипропиленом, съёмных верхних и нижних цапф для подъема, переноса и кантования ТУК, стальных вкладышей в виде толстостенных цилиндров и верхнего комингса. Снаружи и внутри корпус ТУК облицован обечайками из нержавеющей стали. Корпус имеет пять рядов демпфирующих ребер, ориентированных вдоль оси ТУК. Все демпфирующие ребра

обеспечивают снижение механических нагрузок на составные части транспортного упаковочного комплекта в нормальных условиях перевозки и аварийных случаях, а также являются теплоотводящим элементом.

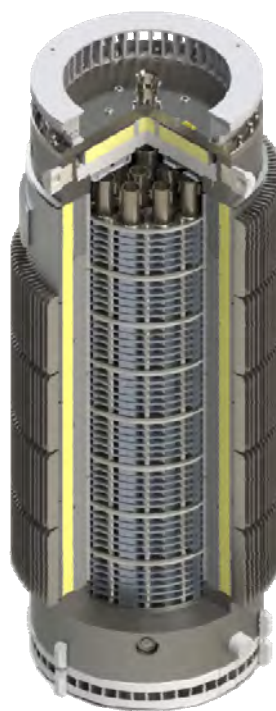


Рис. 1. Общий вид ТУК-137Т

В корпусе ТУК-137Т имеются отверстия для установки клапана сброса избыточного давления и осушки внутренней полости контейнера. Конструкция клапана адаптирована с эксплуатационным оборудованием, используемым на АЭС и ФГУП «ГХК». Во время транспортировки клапан закрывается герметичной крышкой. Так же предусмотрены каналы для контроля герметичности и установки термометра сопротивления.

Крепление внутренней и наружной крышек осуществляется за счет двух рядов шпилек, сваренных в верхний комингс корпуса ТУК. Внутренняя

Технические характеристики

Массово-габаритные характеристики ТУК-137Т представлены в табл. 2.

Таблица 2

Массово-габаритные характеристики ТУК-137Т

Наименование параметра	Значение
Масса ТУК с ОТВС, кг	95000
Масса ТУК без ОТВС, кг	82000
Вместимость чехла (кол-во ОТВС), шт	18
Габаритные размеры ТУК-137Т, мм	
– высота	6229
– диаметр по цилиндрической поверхности контейнера	2150
– диаметр по ребрам	2410
– ширина ТУК-137Т (по цапфам)	2446
Диаметр внутренней полости контейнера, мм	1360
Высота внутренней полости контейнера, мм	4117
Охлаждение контейнера	естественное
Нейтронная защита	полипропилен

Расчеты

В рамках данной работы рассматривались следующие расчетные исследования: расчет радиационной безопасности; анализ теплового состояния; расчет прочности; расчет потерь радиоактивного содержимого.

Расчетная оценка прочности конструкции

Расчетные исследования прочности были направлены на обоснование прочности ТУК-137Т при аварийных механических воздействиях. Представлены результаты трехмерных расчетов динамического деформирования транспортного упаковочного комплекта ТУК-137Т. Расчеты динамического деформирования ТУК-137Т при аварийных падениях выполнены на основе модуля «Прочность» программного комплекса ЛОГОС, который предназначен для численного решения трехмерных задач тепломассопереноса и деформирования пространственных конструкций. Модуль «Прочность» (прежнее название ЛЭГАК-ДК) предназначается для численного решения трехмерных задач статического и динамического деформирования пространственных конструкций при термосиловых воздействиях.

Трехмерная конечно-элементная модель контейнера ТУК-137Т с чехлом и ОТВС была разработана на основе конструкторской документации и твердотельной САД-модели конструкции. Расчетная модель учитывает основные элементы контейнера. Размерность модели 12 260 000 конечных элементов. Общий вид модели ТУК-137Т представлен на рис. 4.

крышка состоит из диска конической формы и герметичного отсека цилиндрической формы, выполненных из нержавеющей стали. Отсек установлен на наружной торцовой поверхности диска и приварен к нему. Полость отсека заполнена полипропиленом. На торцовой внутренней поверхности внутренней крышки установлен съемный проставок из нержавеющей стали. Наружная крышка состоит из диска ступенчатой формы. На наружной торцовой поверхности диска имеются шпильки, предназначенные для крепления с помощью гаек верхнего демпфера. На внутренней торцовой поверхности крышек имеются кольцевые проточки в форме «ласточкиного хвоста», в которых установлены уплотнительные прокладки, выполненные из тепло- и радиационно-стойкой резины.

Верхний и нижний демпферы выполнены из нержавеющей стали и представляют собой сварную конструкцию, состоящую из ребер, связанных между собой обечайками и торцовыми кольцами. В конструкции нижнего демпфера предусмотрены три направляющих для установки ТУК в универсальное гнездо шахты загрузки на АЭС и ФГУП «ГХК». Направляющие также имеются на цилиндрической поверхности контейнера, что обеспечивает возможность установки ТУК-137Т в универсальное гнездо на АЭС и ФГУП «ГХК» без нижнего демпфера. Верхний и нижний демпферы предназначены для снижения нагрузок на ТУК-137Т и не допущения нарушения герметичности при падении в аварийных ситуациях.

Чехол представляет собой разборную металлоконструкцию, состоящую из центральной несущей трубы, приваренной к основанию. На основании вдоль оси центральной несущей трубы установлены и закреплены диски, дистанцируемые друг относительно друга при помощи стоек и шайб. Диски имеют восемнадцать шестигранных отверстий, в которых размещены шестигранные трубы. Диски имеют пазы для установки труб, а также служат для ограничения перемещения труб вдоль оси несущей трубы. В каналах шестигранных труб размещаются тепловыделяющие сборки. Соосно с этими каналами в основании чехла установлены устройства, служащие для поджима ОТВС к внутренней крышке контейнера. Трубы выполнены из шести пластин, сваренных между собой и образующих шестигранник. Пластина представляет собой сварную конструкцию, в которой имеются изолированные отсеки с установленными пластинами бор-содержащего композита, предназначенными для обеспечения ядерной безопасности.

Конструкция чехла предусматривает осевое перемещение дисков и шестигранных труб при тепловом расширении, за счет свободного перемещения дисков вдоль оси чехла. Технологичность чехла заключается в наличии дисков особой конструкции, обеспечивающей фиксацию шестигранных труб с возможностью осевого перемещения, и применении пластин бора, обеспечивающих оптимальный уровень ядерной безопасности. Технологичность обслуживания обеспечивается за счет разборной конструкции чехла.

Общий вид модели чехла показан на рис. 5. ОТВС, установленные внутри чехла, моделируются габаритно-весовыми макетами (ГВМ). Начальные условия задачи задаются в виде равномерного поля скорости по направлению к преграде, приложенного ко всем элементам конструкции. Величина начальной скорости составляет: $V_0 = 13,29$ м/с при падении с высоты $H = 9$ м; $V_0 = 4,43$ м/с при падении с высоты $H = 1$ м. Движение упаковки осуществляется в однородном поле силы тяжести. При проведении расчетов учитывается тепловое состояние элементов конструкции в нормальных условиях эксплуатации и затяжка резьбовых соединений.

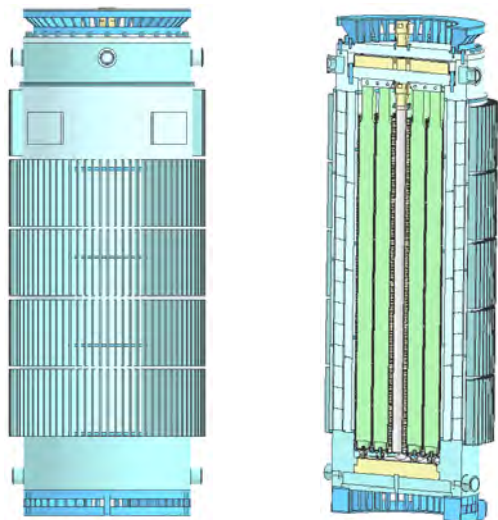


Рис. 4. Расчетная модель ТУК-137Т

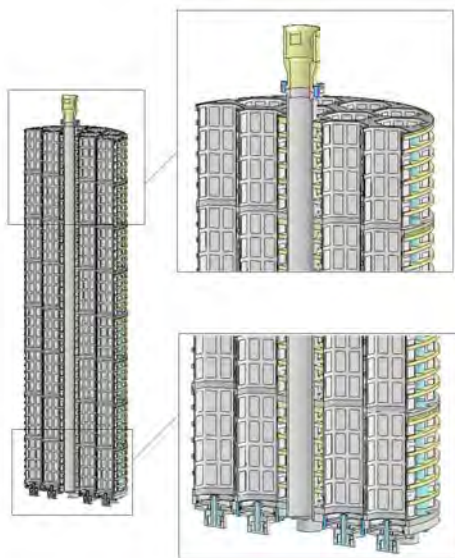


Рис. 5. Расчетная модель чехла

Рассматривалось восемь сценариев аварийного падения контейнера с высоты 9 м [3], отличающихся ориентацией контейнера в момент соударения с преградой и один сценарий падения на штырь с высоты 1 м.

На основании анализа результатов численных исследований динамического деформирования контейнера ТУК-137Т с загруженными ОТВС при аварийных падениях контейнера с высоты $H=9$ м с учетом теплового состояния конструкции можно сделать вывод, что для всех вариантов аварийных падений контейнера с высоты $H = 9$ м максимальные и остаточные значения раскрытия герметизирующих стыков не превышают сборочного поджатия уплотнительных колец.

Для моделирования падения упаковки на штырь в качестве начальных условий использовались параметры напряженно-деформированного состояния конструкции и деформированной конфигурации, полученные по результатам расчета бокового падения упаковки с высоты 9 м. Анализ результатов расчета показал, что максимальная главная растягивающая деформация в зоне удара составляет 31 % (рис. 6). На основании этого, можно заключить, что внешняя обечайка (сталь 12Х18Н10Т, $T = +98$ °С, $\delta = 36$ %) не пробивается штырем и сохраняет прочность. При этом максимальная глубина образующейся вмятины внешней обечайки составляет 81,2 мм. Остаточное значение глубины вмятины оценивается величиной ~51 мм.

Для моделирования погружения контейнера в воду на глубину 200 м использовалась та же расчетная модель, что и при обосновании прочности ТУК-137Т в аварийных падениях. На всей внешней поверхности контейнера действует давление 2 МПа, что соответствует давлению на глубине 200 м. На основании проведенных расчетных исследований можно сделать вывод о сохранении прочности упаковки при погружении на глубину 200 м. Все элементы конструкции деформируются в упругой области. Раскрытие стыка между внешней крышки и верхним комингсом не происходит.

Для анализа ядерной и радиационной безопасности ТУК-137Т требовалось определить параметры деформированного состояния ОТВС, загруженных в контейнер, при аварийных падениях.

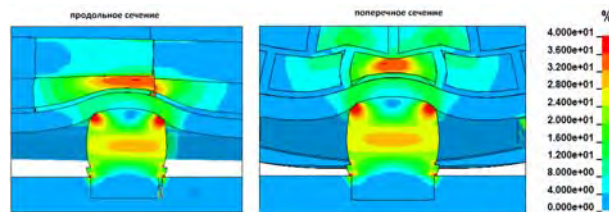


Рис. 6. Растягивающие деформации в зоне соударения со штырем



Рис. 7. Расчетная модель ТВС

В связи с этим, для проведения численных исследований один из габаритно-весовых макетов ОТВС в расчетной модели ТУК-137Т был заменен на полномасштабную модель ТВС (рис. 7). При этом

количество конечных элементов, покрывающих расчетную область задачи, составило ~13,6 млн., количество узлов конечно-элементной сетки составило ~18,6 млн.

На рис. 8 показана деформированная конфигурация ОТВС на момент максимального формоизменения. Как видно из рисунка, в результате падения контейнера происходит потеря устойчивости ТВЭЛов и направляющих каналов, что приводит к их изгибу и взаимным смещениям. На рис. 7 представлено взаимное расположение ТВЭЛов. По результатам расчетов определены координаты центров ТВЭЛов на момент наибольшего прогиба в четырех характерных сечениях ОТВС, необходимые для анализа ядерной и радиационной безопасности упаковки.

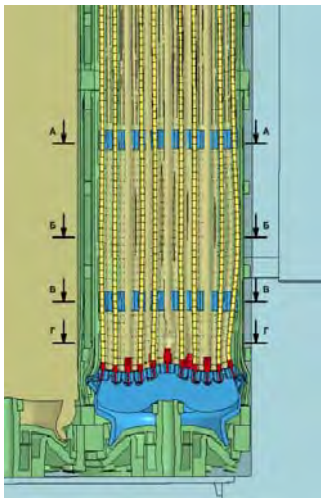


Рис. 8. Деформированная конфигурация ОТВС

Таким образом, на основе представительной трехмерной компьютерной модели выполнены расчеты прочности ТУК-137Т с чехлом:

– при различных ориентациях падения с высоты 9 м на преграду,

– при комбинированном воздействии (боковое падение с высоты 1 м на штырь после бокового падения с высоты 9 м на плиту),

при действии гидростатического давления в результате затопления на глубину 200 м.

На основании анализа результатов численных исследований можно заключить, что конструкция ТУК-137Т соответствует требованиям по безопасности при аварийных механических воздействиях.

Расчетная оценка теплового состояния

В рамках данной работы проводился расчетный анализ теплового состояния ТУК-137Т на соответствие требованиям НП-053-04 [4], МАГАТЭ [3], техническому заданию на ТУК и требованиям к резиновым уплотнениям и сополимеру полипропилена. Согласно этим требованиям, ТУК должен обеспечивать защиту радиоактивного содержимого от термических воздействий в нормальных условиях эксплуатации и

при пожаре. При этом температура оболочек ТВЭЛов не должна превышать 350 °С и кратковременно (не более 12 часов) 380 °С.

При перевозке температура на любой легкодоступной поверхности упаковки с учетом использования защитных средств (ограждений) для ограничения доступа работников транспорта не должна превышать 85 °С. В этих условиях температура в зонах герметизирующих прокладок не должна превышать 200 °С.

Расчеты проводились по разработанной во ВНИИЭФ программе AJAX, основанной на методе конечных элементов, которая включает в себя программные модули для расчетов одномерных и двумерных (плоских, осесимметричных) геометрических моделей. Обоснование соответствия ТУК заданным требованиям проводилось по двумерным моделям. Это связано как с ограничениями программного комплекса AJAX, так и чрезмерно трудоемкими расчетами в случае непосредственного трехмерного моделирования ТУК без определенных геометрических упрощений.

Используемая в данной работе методика такого упрощения была основана на применении тепловых эквивалентов – двумерных областей с соответствующими теплофизическими свойствами, которые обеспечивают такие же максимальные температуры, что и трехмерные модели. Тепловые эквиваленты были применены к следующим конструктивным элементам модели: ТВЭЛ, ОТВС, вставки из карбида бора, трубы чехла, дистанционирующие решетки, чехол, блоки нейтронной защиты. По причине невозможности геометрически корректного осесимметричного моделирования ребер охлаждения использовалась соответствующая корректировка граничных условий. Таким образом, расчет температуры поверхности ТУК при теплообмене конвекцией и излучением проводился для гладкой модели с добавлением поправочных коэффициентов, обеспечивающих соответствие полученных результатов реальной конструкции ТУК-137Т.

Расчеты напряженно-деформированного состояния ТУК, представленные выше, показали, что, с точки зрения влияния на поле температур, деформации корпуса незначительны (при падении на жесткую преграду) или имеют резко выраженный локальный характер (при падении на штырь). Это дало основание для проведения тепловых расчетов на недеформированной геометрии ТУК.

Расчетный анализ теплового состояния ТУК-137Т был выполнен в условиях хранения и транспортирования ОЯТ, а также в условиях пожара 800 °С в течение 30 минут. Получены следующие основные результаты.

1) В условиях нормальной эксплуатации при температуре 38 °С с учетом солнечной инсоляции получены максимальные температуры:

ТВЭЛов 328,7 °С

легкодоступных частей поверхности ТУК 68,7 °С зон

расположения герметизирующих прокладок 75.2 °С.

2) В условиях перевозок железнодорожным транспортом максимальные температуры равны:

ТВЭЛов 332.6 °С

легкодоступных частей поверхности ТУК 70.5 °С

зон расположения герметизирующих прокладок 76.0 °С.

3) Значения максимальных температур при пожаре:

ТВЭЛов 345.5 °С

зон расположения герметизирующих прокладок 119.2 °С.

Таким образом, в части тепловых воздействий рассмотренный ТУК удовлетворяет требованиям правил безопасности при транспортировании.

Расчет потерь радиоактивного содержимого при транспортировании ОЯТ

К радионуклидам, потенциально способным к выходу из ОТВС за пределы упаковочного комплекта, в первую очередь, следует отнести газы: криптон-85, тритий, ксенон, а также летучие радионуклиды, такие как цезий, йод, рубидий, теллур и др. При проведении расчетов рассматривались криптон-85 и цезий.

При оценке потерь радиоактивного содержимого из ТУК-137Т в качестве механизма массопереноса через герметизирующие соединения рассматривались конвективный и диффузионный перенос. Рассматриваемые газы являлись идеальными, концентрации каждого из них по объему контейнера всюду одинаковы. Течение процессов – стационарное, газовые потоки – независимы. Расчет конвективного и диффузионного переноса рассматривался в нормальных и аварийных условиях перевозки.

Согласно полученным результатам, потери радиоактивного содержимого из ТУК в нормальных условиях перевозки за один час не превысят $1,94 \cdot 10^4$ Бк, что соответствует 0,2 % от значения $10^{-6} \cdot A_2$, составляющего $1,0 \cdot 10^7$ Бк. В аварийных условиях перевозки потери за одну неделю могут составить $2,91 \cdot 10^{13}$ Бк, что соответствует ~29 % от регламентируемого Правилами НП-053-04 значения A_2 , равного $1 \cdot 10^{14}$ Бк.

Таким образом, расчетная оценка потерь радиоактивного содержимого в нормальных и аварийных условиях перевозки показала выполнение требований правил НП-053-04 [4].

Расчет радиационной безопасности

Для расчета радиационной защищенности ТУК-137Т использовался модуль расчета переноса гамма-нейтронного излучения программного комплекса TDMCC с рекомендованной для данного класса задач библиотекой ядерно-физических констант ENDF/B-VI. Решение задачи выполнялось по методу Монте-Карло для совместного переноса нейтронов и γ -квантов в трехмерных системах. На основе данных

по изотопному составу ОЯТ были оценены параметры источников гамма- и нейтронного излучения. Так же учитывалось, что в результате аварийного воздействия ТУК получает наибольшие повреждения радиационной защиты.

Согласно результатам проведенных расчетов, опытно-промышленный вариант ТУК-137Т емкостью 18 ОТВС реактора ВВЭР-1000/1200 удовлетворяет требованиям по радиационной безопасности, установленным действующими нормативными документами в части ограничения уровней излучения за защитой упаковки в нормальных и аварийных условиях транспортировки.

Заключение

В результате проведенных работ была разработана конструкция транспортного упаковочного комплекта, предназначенного для перевозки 18 ОТВС РУ ВВЭР-1000/1200. Полученная конструкция в полном объеме отвечает требованиям «Правил безопасности при транспортировании радиоактивных материалов НП-053-04», предъявляемым к упаковкам типа В(У) с радиоактивным содержимым, и требованиям «Правил безопасной перевозки радиоактивных материалов МАГАТЭ №ST-1» [3].

В ходе создания ТУК-137Т впервые в отечественной практике были проведены расчеты при аварийном падении ТУК с полноценной моделью ОТВС (ранее падение моделировалось с габаритно-весовыми макетами), позволяющие поднять достоверность как прочностных, так и расчетов ядерной безопасности на новый уровень. Экспертные организации оценили данный подход к проведению расчетов. В настоящий момент принято решение о необходимости проведения расчетов для всех вновь разрабатываемых конструкций ТУК с полноценной моделью ОТВС.

Чехол для размещения ОТВС является технологичным в изготовлении и обслуживании благодаря разборной конструкции и применению пластин бор-содержащего композита. Данные положения легли в основу патентной заявки на изобретение. Габаритно-массовые характеристики ТУК-137Т позволяют осуществлять перевозку контейнера ж/д транспортером ТК-У-1410. Конструкция ТУК соответствует условиям обращения на АЭС и условиям приемки ОТВС на заводе регенерации. Следующим этапом в создании ТУК-137Т будет изготовление опытного образца.

Ниже перечислены основные преимущества ТУК-137Т в сравнении с ТУК-10, ТУК-13 и зарубежными аналогами (Castor):

- 1) Возможность серийного производства на российских предприятиях. ТУК выполнен целиком из заготовок на основе отечественных материалов;
- 2) Большая вместительность чехла;
- 3) Твердая нейтронная защита;
- 4) Наличие теплостойких герметизирующих прокладок, предотвращающих диффузию радиоактивных газов наружу;

5) Применение коррозионно-стойкой стали вместо чугуна, для которого характерно хрупкое разрушение при минусовых температурах.

6) Применение защитно-демпфирующих ребер, ориентированных по оси контейнера, что обеспечивает более удобную дезактивацию ТУК-137Т.

Реализация данного проекта позволила создать современный контейнер, отвечающий последним требованиям безопасности по обращению с ОЯТ, способный обновить парк транспортных упаковочных комплектов России, и обеспечить нормальное функционирование отрасли.

Литература

1. Бекман И. Н. Ядерная индустрия. Москва, 2003.
2. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009, Москва, 2009.
3. Правила безопасной перевозки радиоактивных материалов. SSR-6. МАГАТЭ, Вена, 2012.
4. Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов [Текст]: НП-053-04: утв. Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору 04.10.04: введ. в действие 05.01.05. – М.: 2004. – 175 с.