

**Материалы 17-го международного симпозиума по
упаковке и транспортировке радиоактивных материалов
PATRAM 2013
18-23 августа 2013 года, Сан-Франциско, Калифорния, США**

**Упаковка типа С: перспективы международной сертификации и дальнейшего
использования**

М.Е. Буду
ООО НПФ «Сосны»,
Москва, Россия

Д.В. Дерганов
ООО НПФ «Сосны»,
Димитровград, Россия

О.А. Савина
ООО НПФ «Сосны»,
Димитровград, Россия

С.В. Комаров
ООО НПФ «Сосны»,
Димитровград, Россия

С. Мозес
Департамент энергетики США/
Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge,
США

АННОТАЦИЯ

В рамках программы RRRFR Департамент энергетики США и российские организации разработали первую упаковку Типа С для воздушных транспортировок ОЯТ ИР в соответствии с Правилами безопасной перевозки радиоактивных материалов МАГАТЭ (TS-R-1). Упаковка ТУК-145/С основывается на контейнере SKODA VPVR/М Типа В, помещенного в защитно-демпфирующий кожух (ЗДК), который обеспечивает герметичность содержимого в случае авиакатастрофы при перевозке ОЯТ.

Так как сопроводительная документация и административные требования для сертификации конструкции упаковки в разных странах варьируются, после получения российского сертификата-разрешения на конструкцию упаковки было решено продолжать разрабатывать единый документ (Справочное руководство), содержащий всю информацию о конструкции, изготовлении, безопасности, техническом обслуживании и управления качеством, которая бы была полезна для многостороннего утверждения сертификата на конструкцию упаковки ТУК-145/С в любой стране. Для этих целей содержание Справочного руководства основывалось на требованиях МАГАТЭ, России, США и Европейского Союза. Разработка Справочного руководства начиналась с подготовки российской технической документации на сертификацию. Была выполнена независимая оценка на соответствие требованиям МАГАТЭ, России, США, и Европейского Союза, подготовлены рекомендации и выпущен окончательный вариант Справочного руководства, который был одобрен для последующих сертификационных процедур.

В докладе представлен процесс разработки Справочного руководства для ТУК-145/С и требования к пакету документов по безопасности для сертификации конструкции упаковки в разных странах. Представлены предложения по использованию существующих технологий ТУК-145/С и перспективы их дальнейшего развития и использования.

РАЗВИТИЕ ПРАВИЛ ВОЗДУШНОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ РАДИОАКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Основную роль в развитии правил воздушной перевозки радиоактивных материалов играла необходимость осуществления перевозок плутония для военных целей и МОКС топлива для гражданских программ. Ранние редакции Правил безопасной транспортировки радиоактивных материалов МАГАТЭ (вплоть до 1996 года) не содержали ограничений для конструкций упаковок, предназначенных для воздушных перевозок радиоактивных материалов, связанных с

аварийными условиями. Однако нормативные ограничения для воздушных транспортировок появились намного раньше, поскольку потенциальные последствия воздушных перевозок гораздо серьезнее, чем для сухопутных или морских перевозок.

Например, в Соединенных Штатах Публичный закон 94-79, принятый в августе 1975 года, установил следующее ограничение для Комиссии по ядерному регулированию: «Комиссия по ядерному регулированию не должна сертифицировать какие-либо воздушные перевозки плутония в любой форме, будь то экспорт, импорт, либо внутренние перевозки, однако, под данное ограничение не подпадает любой плутоний в любой форме, содержащийся в медицинских устройствах, предназначенных для частного применения. Данное ограничение должно оставаться в силе, пока Комиссия по ядерному регулированию не сертифицирует Объединенному комитету Конгресса по атомной энергии, что был разработан и испытан безопасный контейнер, эксплуатация которого не приведет к его повреждению при аварии и тестовом взрыве, эквивалентному аварии и взрыву самолета» [1]. Соответственно, Комиссия издала в 1978 году «Квалификационные критерии для сертификации упаковки для воздушной транспортировки плутония» (NUREG-0360). Ниже изложены указанные в критериях требования к упаковке при аварийных испытаниях [2]:

- Столкновение с жесткой преградой: Упаковка посредством ракеты посылается в жесткую устойчивую преграду на скорости как минимум 422 футов/с (129 м/с) или на скорости свободного падения, которая выше, в наиболее опасной ориентации, приводящей к максимальному повреждению.
- Тепловые испытания: Контейнер помещается над бассейном с авиационным топливом JP-4 или JP-5 и подвергается воздействию интенсивного пламени, распространяющегося в горизонтальном направлении приблизительно на 1-3 м (3-10 футов) как минимум в течение 60 минут. Контейнер располагается в наиболее опасной ориентации, приводящей к максимальному повреждению. Затем контейнер охлаждается естественным образом или путем распыления воды, используется вариант, который приводит к наибольшим повреждениям. (Температура пламени составляет 760 - 1 315 °C или 1 400-2 400 °F.)
- Погружение в воду: Погружение на глубину не менее 3 футов (1м) как минимум на 8 часов.
- Испытание на прокол/разрыв: Если масса упаковки не превышает 250 кг, зонд из мягкой стали весом 250 кг в форме усеченного конуса (длиной 12 дюймов (30 см), диаметром основания 8 дюймов (20 см), диаметром вершины 1 дюйм (2,5 см)) сбрасывается на упаковку с высоты 10 футов (3 м) в наиболее опасной ориентации, приводящей к максимальному повреждению. При испытании упаковок с массой более 250 кг конус помещается на плоскую поверхность, и на него сбрасывается упаковка с высоты 10 футов (3м).
- Испытание на рассечение: Ориентировочно в центр контейнера сбрасывается с высоты не менее 150 футов (46 м) профильный стальной уголок (длиной не менее 6 футов (2 м) с ножками длиной 5 дюймов (13 см) и толщиной 1,5 дюйма (1,3 см)). Затем контейнер поворачивается на 90 градусов, и процедура повторяется.
- Статические испытания на сжатие: На контейнер, находящийся в наиболее опасной ориентации, приводящей к максимальному повреждению, помещается стальная плита, на которую посредством прямой стальной цельной балки производится давление весом в 70 000 фунтов (32 т).

В результате компанией Sandia Laboratories была разработана упаковка для воздушной перевозки плутония, модель PAT-1, удовлетворяющая всем требованиям NUREG-0360. В 1978 году PAT-1 была сертифицирована как упаковка, способная сохранять целостность при серьезных авиакатастрофах. Упаковка была сертифицирована для транспортировки до 2 кг PuO₂

с максимальным остаточным тепловыделением 25 Вт. Энергопоглощающим элементом являлась внешняя сборка из отборного высушенного в печи красного дерева, материала, имеющего высокую удельную энергию и огнестойкие характеристики [3].

В апреле 1993 МАГАТЭ был издан документ TECDOC-702 «Воздушная транспортировка радиоактивных материалов в больших объемах высокой активности». «Правила безопасной транспортировки радиоактивных материалов» МАГАТЭ редакции 1996 года содержали более строгие требования к упаковкам, предназначенным для воздушной транспортировки. В частности, были представлены новые правила, касающиеся ограничений до $3000A_2$ на радиоактивность содержимого упаковки типа В для материалов неособого вида при воздушных перевозках, подкритичность отдельной упаковки после серии установленных испытаний, а также впервые было введено понятие «упаковка типа С». Позднее в Правилах МАГАТЭ в редакциях 2005, 2009 и 2012 годов было подтверждено действие данных пунктов [4].

КРАТКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ТУК-145/С (ТИП С)

Идея разработки упаковки для воздушных перевозок без ограничений по активности радиоактивного содержимого (упаковки типа С) возникла после выполнения первой сертифицированной по новым правилам (не на специальных условиях) перевозки в Россию ОЯТ ИР в ТУК-19 (типа В) из Румынии в 2009 году, выполненной в рамках Инициативы по снижению глобальной угрозы NNSA и программы RRRFR. К настоящему времени выполнено 6 аналогичных вывозов ОЯТ ИР в Россию в ТУК-19 (из Ливии – 1, из Узбекистана – 2, из Румынии – 3).

В рамках программы RRRFR по заказу Департамента энергетики США в 2009 году начались работы по разработке упаковки типа С на базе контейнера SKODA VPVR/M для воздушных перевозок ОЯТ ИР. Работы были направлены на усиление безопасности воздушных перевозок радиоактивных материалов. Действующие требования российских и международных правил для упаковки типа С не накладывают никаких дополнительных ограничений по активности радиоактивного содержимого, но требуют выполнения сохранения герметичности упаковки после испытаний на столкновение на скорости не менее 90 м/с и при воздействии пожара в течение часа.

ТУК-145/С, представленный на рисунке 1, состоит из двух основных частей [5]:

- защитно-демпфирующей кожух (ЗДК) для поглощения динамического ускорения в случае авиакатастрофы,
- контейнер SKODA VPVR/M внутри ЗДК для обеспечения герметичности и предотвращения утечки радиоактивного содержимого при нормальных и аварийных условиях перевозки.

ЗДК представляет собой цилиндр, состоящий из двух частей (верхней и нижней), подобных по конструкции, наполненных энергопоглощающими элементами – полыми титановыми сферами. Контейнер SKODA VPVR/M устанавливается во внутреннюю нишу ЗДК. Основные характеристики ТУК-145/С представлены в таблице 1.

ЗДК, выполняющий функцию динамической защиты в случае авиакатастрофы, был разработан для поглощения силы удара с жесткой преградой на скорости не менее 90 м/с до такого уровня нагрузки, который может выдержать корпус контейнера SKODA VPVR/M (в том числе, во время сухопутных перевозок в случае чрезвычайных ситуаций).

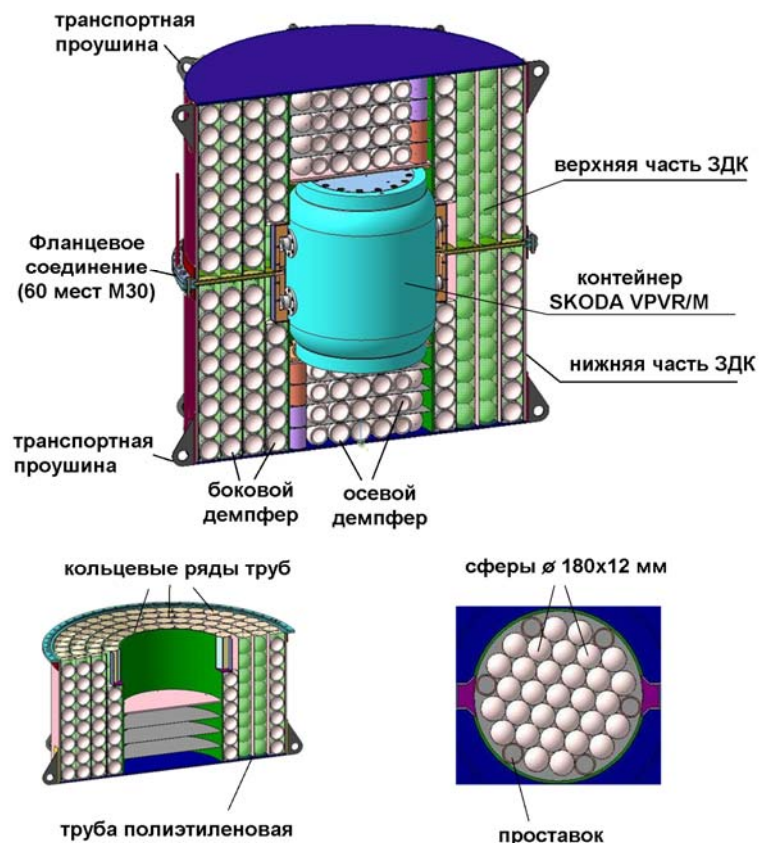


Рис. 1. ТУК-145/С

Таблица 1. Технические характеристики ТУК-145/С

Показатель	Значение
Масса загруженного ТУК-145/С, кг	29 650
Масса порожнего ТУК-145/С, кг	29 200
Масса ЗДК, кг	18 500
Максимальная масса загружаемых ОТВС, кг	450
Количество ячеек для ОТВС	36
Срок эксплуатации, лет	30
Высота, мм	3065
Ширина, мм	3168
Диаметр, мм	2816

МЕЖДУНАРОДНАЯ СЕРТИФИКАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ И ПЕРЕВОЗКИ ТУК-145/С И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО ДАЛЬНЕЙШЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Международная сертификация конструкции любой упаковки для перевозки радиоактивных материалов начинается с утверждения сертификата-разрешения на конструкцию упаковки, выданного компетентной организацией в стране изготовителя данной упаковки. Первый российский сертификат-разрешение № RUS/3166/CF-96 на конструкцию упаковки ТУК-145/С

был выдан ГК «Росатом» в 2012 году. В него были включены несколько типов ОТВС ИР (ИРТ-2М, ИРТ-3М, ИРТ-4М, ВВР-М, ВВР-М2, ВВР-М5, ВВР-М7, ВВР-(С)М, С-36, ЭК-10, ТВР-С), но также в упаковке ТУК-145/С можно переводить другие виды радиоактивных материалов при наличии дополнительного анализа безопасности.

Организация воздушной транспортировки ТУК-145/С самолетами Ан-124-100 (Ил-76) зависит от транспортной и погрузочной инфраструктуры на объекте грузоотправителя, и, таким образом, возможны несколько вариантов сертификата на перевозку. Ниже описаны два варианта транспортировки упаковки ТУК-145/С бортами Ан-124-100 и один возможный вариант бортом Ил-76.

Вариант 1: Комбинированная воздушная и автодорожная транспортировка ТУК-145/С с ОТВС (Ан-124-100)

Для безопасной транспортировки упаковки ТУК-145/С, содержащей контейнер SKODA VPVR/М с ОТВС, при первом варианте предполагается наличие хорошей дорожной инфраструктуры между грузоотправителем и аэропортом отправления. Как можно видеть из таблицы 1, вес загруженного ТУК-145/С составляет 29,65 т, к которому добавляется вес автотранспорта.

В данном случае контейнер SKODA VPVR/М с ОТВС загружают в ЗДК на объекте грузоотправителя, формируя ТУК-145/С, и затем транспортируются в аэропорт посредством специального полуприцепа и тягача. ТУК-145/С, уже закрепленный на полуприцепе, фронтально загружается тягачом в Ан-124-100 (рис. 2).

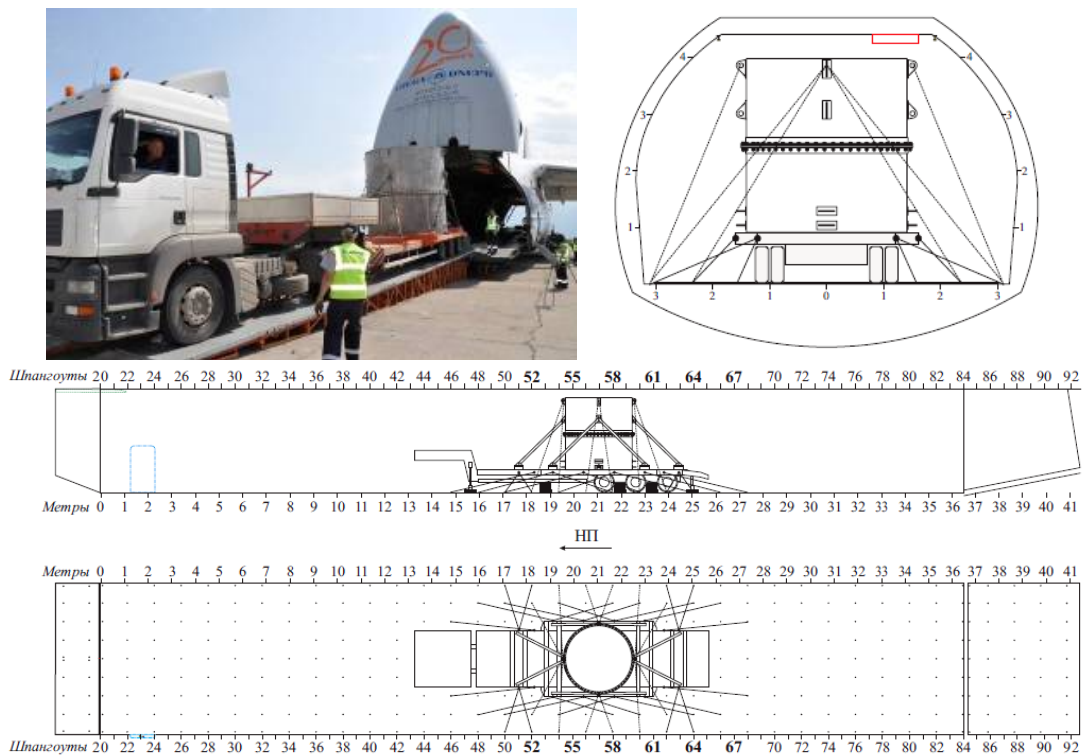


Рис.2. Загрузка ТУК-145/С на борт Ан-124-100 на специальном полуприцепе (Вариант 1)

Упрощенная транспортная схема, применяемая в данном случае, представлена на рис. 3.



Рис. 3. Упрощенная транспортная схема, Вариант 1, Ан-124-100

Следует отметить, что для комбинированной транспортировки ТУК-145/С (автотранспортом и воздушным транспортом) требуется один сертификат.

Для данного варианта транспортировки ТУК-145/С в 2013 году ГК «Росатом» выпустила единый сертификат № RUS/3166/CF-96Т (Rev.1), который недавно был утвержден Венгерским Агентством по ядерной энергии для дальнейших перевозок.

Вариант 2: Автотранспортировка контейнера SKODA VPVR/М и воздушная перевозка ТУК-145/С (Ан-124-100)

Данный вариант может быть безопасно применен в случае неразвитой дорожной инфраструктуры между объектом грузоотправителя и аэропортом отправления. В этом случае контейнер SKODA VPVR/М с ОТВС (сертифицированная упаковка типа В) перевозится в аэропорт автотранспортом в специальном 20-футовом ISO-контейнере посредством соответствующего стандартного полуприцепа и грузовика. Вес SKODA VPVR/М с ОТВС с установленными демпферами составляет менее 13 т, а вместе с ISO-контейнером весит до 20 т. Затем в аэропорту SKODA VPVR/М загружают в заранее доставленный ЗДК, формируя ТУК-145/С, который грузят на борт самолета Ан-124-100 посредством специальной роликовой системы (рис. 4).

Упрощенная транспортная схема, применяемая в данном случае, представлена на рис.5.

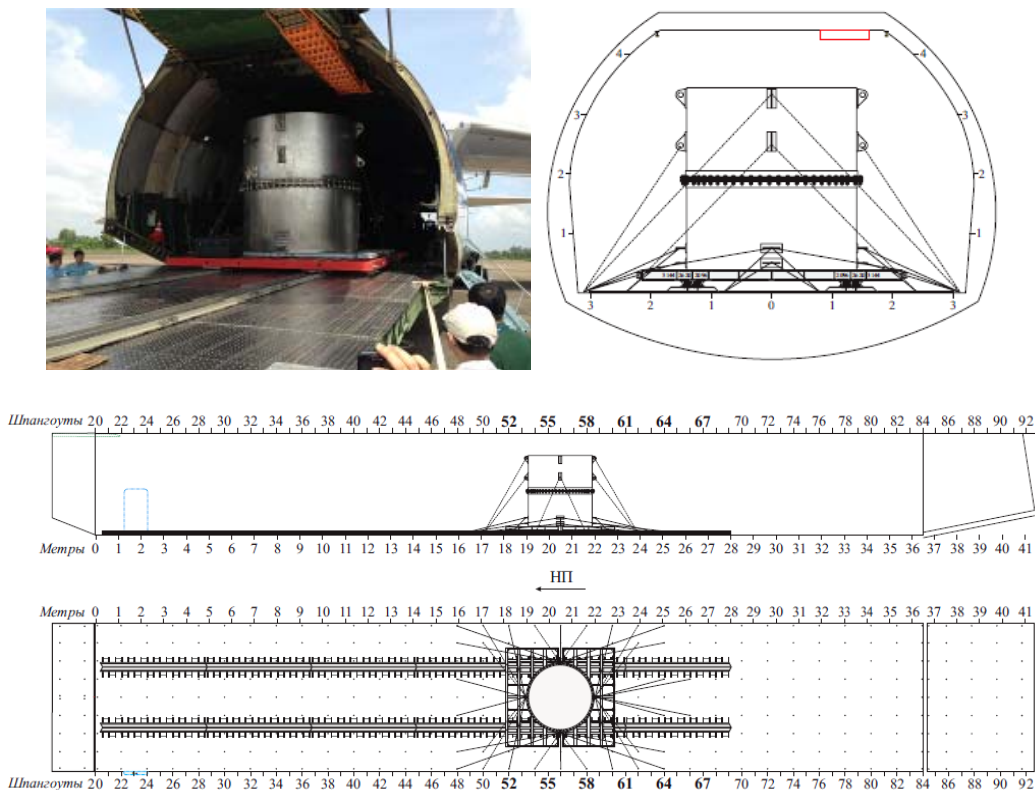


Рис. 4. Загрузка ТУК-145/С на борт Ан-124-100 посредством специальной роликовой системы (Вариант 2)

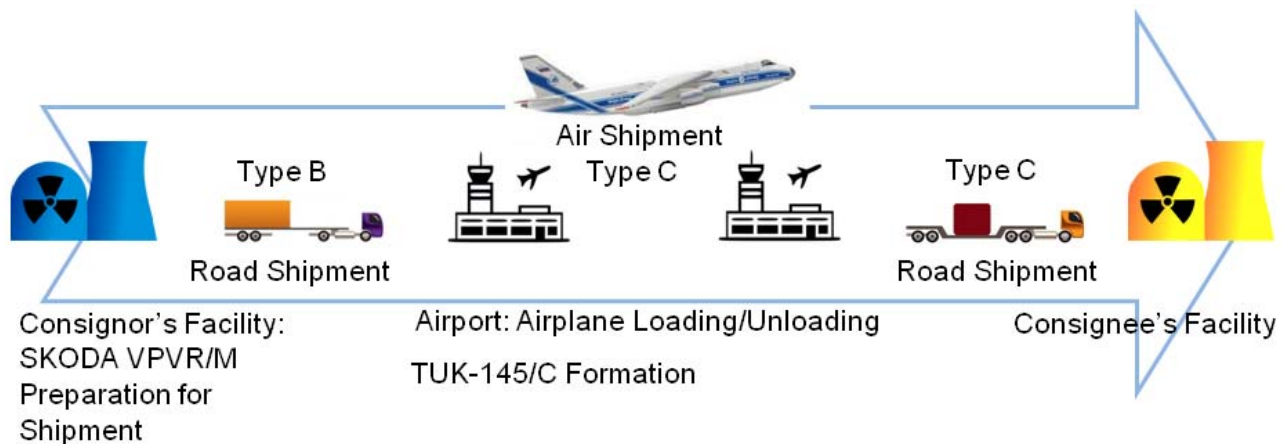


Рис. 5. Упрощенная транспортная схема, Вариант 2, Ан-124-100

Следует заметить, что в данном случае требуется два сертификата – на наземную транспортировку SKODA VPVR/M и воздушную транспортировку ТУК-145/С. Для данного варианта наземной транспортировки SKODA VPVR/M и воздушной транспортировки ТУК-145/С в 2012 году ГК «Росатом» выпустила сертификаты № RUS/3065/B(U)F-96T (Rev.7) и № RUS/3166/CF-96T (Rev.1), которые были утверждены Вьетнамским министерством наук и технологий. Первая воздушная транспортировка ОЯТ ИР в упаковке типа С из Вьетнама в Россию была выполнена в 2013 году.

Перспективы дальнейшего использования ТУК-145/С

Упаковку ТУК-145/С также можно перевозить меньшим по размеру самолетом Ил-76 в горизонтальном положении, используя специальную позиционирующую раму – Вариант 3 (рис. 6).



Рис. 6. Загрузка ТУК-145/С на борт Ил-76 посредством специальной рамы (Вариант 3)

Сравнение трех вариантов воздушной перевозки приведено в таблице 2.

Таблица 2. Варианты воздушной перевозки ТУК-145/С

Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Масса одной упаковки с грузовиком – 47 т Вместимость – до 2 ТУК-145/С Общий вес груза – 94 т <i>(не требуется подставки)</i>	Масса одной упаковки с подставкой – 32,2 т Вместимость – до 3 ТУК-145/С Общий вес груза – 104 т <i>(с подставкой)</i>	Масса одной упаковки с рамой – 32 т Вместимость – 1 ТУК-145/С Общий вес груза – 38 т <i>(с роликовой системой)</i>

Как сообщается в данной главе, существуют различные варианты организации транспортировки ТУК-145/С, и лицензирование конструкции и транспортировки в соответствии с Правилами безопасной транспортировки МАГАТЭ может быть эффективно реализовано, при условии, что безопасность транспортировки должным образом обоснована.

ТУК-145/С можно использовать для будущих транспортировок:

- ОЯТ ИР;
- фрагментов ОТВС энергоблоков для исследований;
- высокоактивных радиоактивных отходов для хранения и захоронения;
- инкапсулированных радионуклидных источников;
- активной зоны малогабаритного реактора источника нейтронов (MNSR) для переработки;
- жидкого отработавшего ядерного топлива;
- для экстренных транспортировок (в случае войны, при экстремальных метеорологических условиях и т.д.)

Применение воздушных перевозок может помочь в достижении труднодоступных мест, при оптимизации графика поставок в больших программах или при ограниченном количестве транспортных упаковок. Также воздушные перевозки являются более безопасными на длинных маршрутах, позволяют избежать провоза опасных грузов в непосредственной близости от населенных пунктов или природоохранных зон и т.д.

РАЗРАБОТКА СПРАВОЧНОГО РУКОВОДСТВА ДЛЯ ТУК-145/С

ТУК-145/С был использован в июле 2013 года для вывоза ВОУ ОЯТ ИР из Вьетнама в Россию, также его применение планируется для подобных транспортировок из Венгрии и Узбекистана. В преддверии дальнейшего применения ТУК-145/С, принимая во внимание преимущества воздушных транспортировок, была рассмотрена возможность подготовки единого документа (Анализ безопасности упаковки ТУК-145/С или «Справочного руководства») [6]. Эта необходимость возникла из-за того, что нормативные требования относительно содержания пакета документации по безопасности и административные процедуры выдачи сертификатов на конструкцию и перевозку упаковки не согласованы на международном уровне, хотя основные технические требования к упаковкам очень схожи, так как основываются на Правилах МАГАТЭ по безопасной перевозке радиоактивных материалов.

Подготовка руководства осуществлялась с учетом следующих документов: Правила безопасной перевозки радиоактивных материалов МАГАТЭ (TS-R-1/SSR-6), Нормативный справочник США 7.9 (Стандартный формат и содержание Части 71 Заявки для утверждения упаковок для радиоактивных материалов) и 7.10 (Создание программ обеспечения качества для упаковки, использующейся при перевозке радиоактивных материалов), Российские Правила безопасности при перевозке радиоактивных материалов НП-053-04 и Административный регламент (утвержденным приказом № 527/2007), и Техническое руководство ЕС – Отчет по безопасности конструкции упаковки для перевозки радиоактивных материалов (PDSR, 2009 и 2012 годов издания).

Сравнение разделов Справочного руководства ТУК-145/С и перечисленных требований приводится в таблице 3.

Таблица 3. Сравнение разделов Справочного руководства по ТУК-145/С и требований нормативных документов

ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ	ОПИСАНИЕ УПАКОВКИ ТУК- 145/С	ОЦЕНКА КОНСТРУКЦИИ	ТЕПЛОВАЯ ОЦЕНКА	СИСТЕМА ГЕРМЕТИЗАЦИИ	ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ	ОЦЕНКА КРИТИЧНОСТИ	ОПЕРАЦИИ С УПАКОВКАМИ	ПРИМЕОЧНЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ОБСЛУЖИВАНИЕ	СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА	ПРИЛОЖЕНИЯ	ПРАВИЛА ИЛИ РЕКОМЕНДАЦИИ
-	809b, 809a	809c, 809f	809c, 809f	809c, 809e, 809f	809 f	809c, 809f /677b	809d, 809g	809d	809i	809a-h	Правила МАГАТЭ SSR- 6
1.1	1.2	2	3	4	5	6	7	8	- (RG 7.10)	В конце каждой главы	Нормативный справочник 7.9 US NRC
11.2l	11.2a, 11.2b, 11.2g	11.2b, 11.2c, 11.2d, 11.2j, 11.2m	11.2c, 11.2d	11.2c, 11.2d, 11.2e	11.2c, 11.2d	11.2c, 11.2d, 11.2h	11.2f	11.2c	11.2k	11.2o, 11.2g, 11.2n	Российский административный регламент
1.2	1.2, 1.3, 1.5	1.4, 1.6, 2.1, 2.2.1	1.4, 2.1, 2.2.2	1.4, 2.1, 2.2.3	1.4, 2.1, 2.2.4	2.1, 2.2.5	1.7	1.7, 1.8	1.9	1.10	Отчет по безопасности конструкции упаковки ЕС 2012

Анализ содержания Справочного руководства ТУК-145/С на соответствие указанным правилам и краткие выводы из этого анализа представлены в таблице 4.

Таблица 4. Анализ содержания Справочного руководства ТУК-145/С и различных требований для содержания документации по безопасности конструкции упаковки

	Правила МАГАТЭ SSR-6	Нормативный справочник США 7.9	Российский административный регламент	Отчет по безопасности конструкции упаковки ЕС 2012
Соответствие	100% соответствие	95% соответствие	100% соответствие	100% соответствие
Выводы	Мало информации о содержании заявки и низкий уровень детализации. Возможно двойное толкование.	Наличие дополнительных требований по сравнению с другими подобными правилами.	Мало информации об ожидаемом уровне детализации. Основывается на нескольких отдельных документах, а не на едином отчете по безопасности упаковки.	Формулировка требований отличается от формулировок других подобных правил.

Основываясь на представленной выше информации, можно прийти к следующим выводам:

- Структура Справочного руководства наиболее соответствует требованиям Справочника США 7.9, так как он был выбран в качестве модели при его разработке. Однако из-за наличия дополнительных правил данного документа, полное соответствие не было достигнуто.
- Российский административный регламент предполагает предоставление множества отдельных документов, содержащих требуемую информацию для обоснования безопасности упаковки. Принимая во внимание то, что документация по безопасности ТУК-145/С подготовлена исходя из этого подхода, разработка отчета по безопасности упаковки или справочного руководства (в нашем случае) является сложной и трудоемкой.
- Техническое руководство ЕС - Отчет по безопасности конструкции упаковки, изданное в 2012 году, имеет четкую и эффективную структуру, которая может быть легко применена к любому типу документации по безопасности (либо одному отчету безопасности, как в Справочнике США, либо нескольким документам, как и в российском административном регламенте). Поэтому хороший уровень соответствия Справочного руководства к требованиям технического руководства ЕС был достигнут. Тем не менее, формулировка

требований отличается, поскольку требуется отдельная оценка эффективности упаковки, которая в других случаях может быть распространена на все части документации по безопасности (например, эффективность экранирования учтена в оценке радиационной защиты и т.д.). Все же это плюс, так как регулирующим органам проще оценить PDSR, чем другую документацию по безопасности без отдельной оценки эффективности.

- При сравнении с проанализированными национальными правилами и рекомендациями (США, России, ЕС), МАГАТЭ SSR-6 содержит меньший объем рекомендаций и требований для заявок о выдаче сертификата-разрешения на конструкцию упаковки и оставляет большой простор для толкования, которые заявитель должен учесть. По этой причине новая справочная документация МАГАТЭ для заявителей и регулирующих органов относительно разрешительного пакета документов на конструкцию и перевозку упаковки приветствуется.

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ТУК-145/С ПРИ СОУДАРЕНИИ С МЯГКИМИ ГРУНТАМИ НА СКОРОСТИ 90 м/с

Дополнительно был выполнен анализ динамической деформации ТУК-145/С при соударении с мягкими грунтами на скорости 90 м/с.

На основе анализа процессов динамического деформирования грунтов различного типа определены типовые представители грунтов, в качестве которых предложены:

- песок плотностью $1,68 \text{ г/см}^3$ – наиболее «мягкая» грунтовая преграда;
- супесь плотностью 2 г/см^3 и влажностью 14% – «средняя»;
- суглинок плотностью $1,97 \text{ г/см}^3$ – наиболее «жесткая» грунтовая преграда.

Были проанализированы случаи осевого, бокового и углового (42 градуса) падения ТУК-145/С со скоростью 90 м/с на вышеперечисленные грунты.

На момент окончания счета осевого, бокового и углового падения ТУК-145/С внедрился в грунт на 1,2; 0,9 и 1,7 м соответственно. Максимальные уровни деформаций не превышают величину относительного удлинения материала деталей конструкции ЗДК, при которой происходит их разрушение (ОТ4, $\delta=20\%$). Более детально анализировались участки соединения, находящиеся вблизи ударной зоны. Болты деформируются упруго. Максимальный уровень напряжений, реализующийся в локальных зонах на болтах соединения, не превышает 58, 30 и 50 кг/мм^2 в случае осевого, бокового и углового падения, соответственно, что существенно ниже предела текучести для материала болтов ($\sigma_{0,2}=64 \text{ кг/мм}^2$) (рис. 7).

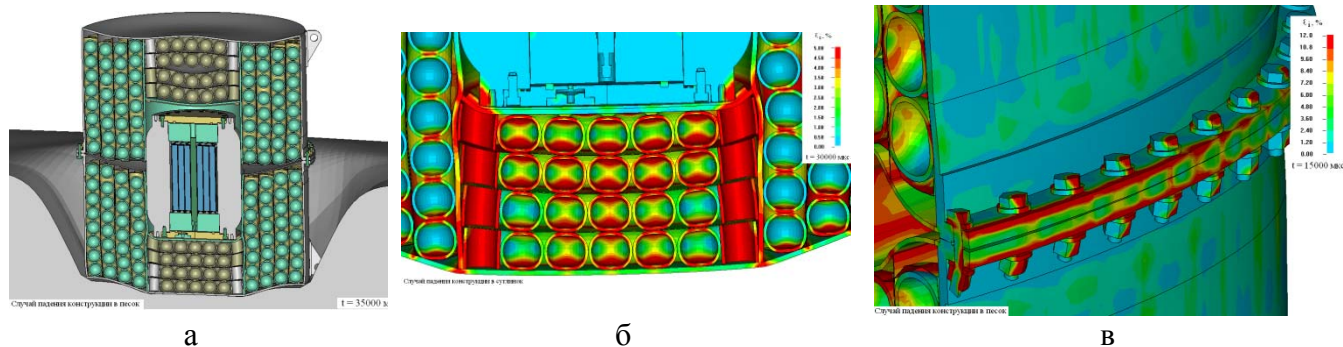
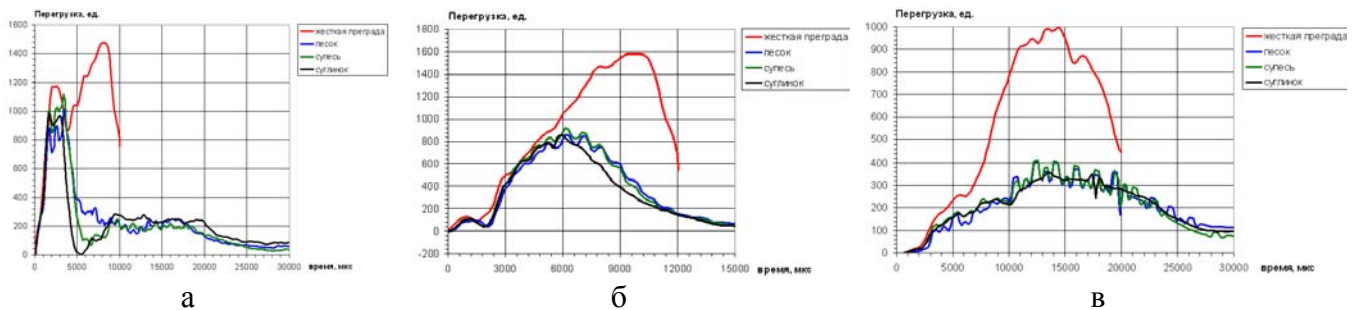


Рисунок 7. Состояние конструкции ТУК-145/С на момент окончания счета при падении в песок (а); поле распределения интенсивности полных деформаций при падении в суглинок (б); пример распределения интенсивности напряжений на участках соединения, находящихся вблизи ударной зоны (в)

На рис. 8 представлены кривые изменения во времени перегрузки на корпусе контейнера SKODA VPVR/M в случае падения ТУК-145/С на жесткую преграду и в случае падения на грунты.



**Рисунок 8. Изменение во времени перегрузки на корпусе контейнера SKODA VPVR/M в случае падения ТУК-145/С на жесткую преграду и на грунты:
а – осевое падение, б – боковое падение, в – угловое падение**

Во всех рассмотренных расчетных случаях столкновения ТУК-145/С с поверхностью грунта демпфирующая система ЗДК обеспечивает снижение ударной нагрузки, приходящейся на контейнер SKODA VPVR/M, до уровня, при котором контейнер сохраняет свою целостность и герметичность.

При падении ЗДК на грунты уровень перегрузок, реализующихся на элементах контейнера SKODA VPVR/M, существенно ниже по сравнению с перегрузками, возникающими на контейнере при падении ЗДК на жесткую преграду.

При этом для случаев соударения с песком, супесью и суглинком реализовались, соответственно:

- максимальные значения перегрузок на корпусе контейнера SKODA VPVR/M:
 - для осевого - 1000 ед., 1100 ед., 950 ед. (1500 ед. - для жесткой преграды);
 - для бокового - 850 ед., 900 ед., 880 ед. (1600 ед. - для жесткой преграды);
 - для углового - 400 ед., 420 ед., 360 ед. (1000 ед. - для жесткой преграды);
- максимальный ход демфера (величина смятия демпферной системы ЗДК в направлении падения):
 - для осевого - 110 мм, 140 мм, 136 мм (460 мм - для жесткой преграды);
 - для бокового - 190 мм, 220 мм, 180 мм (650 мм - для жесткой преграды);
 - для углового - 220 мм, 275 мм, 270 мм (1100 мм - для жесткой преграды).

ВЫВОДЫ

В настоящее время по сравнению с 1970-ми годами современные международные и национальные нормативно-правовые базы достаточно развиты и эффективно обеспечивают безопасность при воздушных перевозках ОЯТ как при нормальных, так и аварийных условиях транспортировки. В соответствии с данными базами, созданная первая упаковка типа С для воздушной перевозки ОЯТ ИР позволила достичь значительного прогресса в обеспечении повышенной эффективности безопасности, надежности и выполнения графика таких операций. Гибкая технология ТУК-145/С и возможности его международного лицензирования могут соответствовать требованиям для любого будущего использования: для перевозок ОЯТ ИР на исследования, переработку или хранение; для перевозок фрагментов ОТВС энергетических реакторов в целях исследований причин повреждений; высокоактивных радиоактивных отходов или закрытых радиоактивных источников, активной зоны малогабаритного реактора источника

нейтронов (MNSR); жидкого отработавшего топлива ИР; а также для экстренных транспортировок при военной или теоретической угрозе или в случаях экстремальных природных явлений.

В случае воздушной транспортировки или длительной перевозки радиоактивных материалов с пересечением территории нескольких стран необходима более высокая степень международной гармонизации требований к заявкам на выдачу сертификата-разрешения на конструкцию и перевозку упаковки, и их рассмотрение регулирующими органами в целях повышения эффективности нормативного регулирования перевозок радиоактивных материалов во всем мире. Это возможно достигнуть путем разработки и внедрения новой справочной документации МАГАТЭ для заявителей и регулирующих органов относительно заявочной документации на конструкцию и перевозку упаковки и ее рассмотрения, на основе модели PDSR ЕС, которая успешно начала путь согласования между странами ЕС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Nuclear Engineering International Magazine, “Transporting Plutonium by Air”, 1 January 1998 (<http://www.neimagazine.com/features/featuretransporting-plutonium-by-air>).

[2] Nuclear Control Institute, “Air Transport Accident Conditions: Comparison of International & U.S. Safety Standards for Plutonium Air Shipments” (<http://www.nci.org/a/atactbl.htm>).

[3] U. S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, “Plutonium Air Transportable Package Model PAT-1 - Safety Analysis Report”, NUREG-0361, June 1978.

[4] O.P. BARINKOV, S.V. KOMAROV, A.E. BUCHELNIKOV, V.I. SHAPOVALOV, A.I. MORENKO, “Preparation of the First Air Transport of Spent Fuel Certified to New Requirements”, Environmental Safety, No. 1, 2011 (special edition).

[5] S.V. KOMAROV, M.E. BUDU, D.V. DERGANOV, O.A. SAVINA, I.M. BOLSHINSKY, S.D. MOSES, L. BIRO, “Licensing Air and Transboundary Shipments of Spent Nuclear Fuel”, International Conference on the Safe and Secure Transport of Radioactive Materials: The Next Fifty Years - Creating a Safe, Secure and Sustainable Framework, Vienna, Austria, 17-21 October 2011.

[6] S.V. KOMAROV, O.A. SAVINA, A.I. IVASHKIN, D.V. DERGANOV, M.E. BUDU, “Type C Package: Handling and Application Prospects”, RRRFR Lessons Learned Workshop, Sevastopol, Ukraine, June 12-14, 2013.