ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ ОЯТ ПО ВОЗДУХУ: ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ

SPENT NUCLEAR FUEL AIR SHIPMENT: SAFETY JUSTIFICATION

Б.А. КАНАШОВ,
О.П. БАРИНКОВ,
А.Н. ДОРОФЕЕВ,
С.В. КОМАРОВ
(ООО НПФ «Сосны»)

B.A. KANASHOV,
O.P. BARINKOV,
A.N. DOROFEEV,
S.V. KOMAROV
(R&D Company "Sosny")

Традиционно отработавшие тепловыделяющие сборки (ОТВС) в пределах Российской Федерации перевозились по железной дороге в специальных вагонах. Международная программа возврата ОЯТ исследовательских реакторов (ИР), построенных по российским проектам, поставила перед предприятиями отрасли новые задачи, заставив использовать практически все виды транспорта, в том числе воздушный.

Большинство исследовательских реакторов не могут принимать на своей территории тяжелые и крупногабаритные контейнеры. Использование российского контейнера ТУК-19 массой до 5 т не требует значительной модернизации оборудования ИР; более того, расчеты показали, что в нем можно перевозить ОЯТ ИР всеми видами транспорта, включая воздушный. Поэтому было решено использовать ТУК-19 в проекте по вывозу ОТВС из института IFIN-HH (город Магуреле, Румыния).

Для решения поставленной задачи было необходимо:

— разработать транспортный пакет, обеспечивающий перевозку упаковок ТУК-19 различными видами транспорта;

— обосновать безопасность конструкции упаковки для осуществления воздушной перевозки;

— обосновать безопасность самой перевозки.

В проекте были задействованы грузополучатель (ФГУП «ПО «Маяк»), перевозчик (ОАО «Авиакомпания «Волга-Днепр»), изготовитель грузовых контейнеров (ОАО «Абаканвагонмаш»), изготовитель оборудования для раскрепления ТУК-19 (ООО «Озерский завод нестандартного оборудования»), главное управление Российского морского регистра судоходства (РМРС), экспертные организации (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», ФГУП «АТЦ СПб») и разработчик технологии и оборудования (ООО НПФ «Сосны»). Работы проводились под контролем и общим руководством Департамента ядерной и радиационной безопасности, организации лицензионной и разрешительной деятельности ГК «Росатом». Заказчиком выступала Национальная комиссия по ядерному регулированию Румынии (CNCAN).

РАЗРАБОТКА ТРАНСПОРТНОГО ПАКЕТА

Для обеспечения мультимодальности перевозки был разработан транспортный пакет на основе специализи-

Spent fuel assamblies (SFAs) has been traditionally shipped across Russia only by rail before. The International Program on Russian-Origin Research Reactor Fuel Return (RRRFR) has assigned new tasks to nuclear power enterprises making them involve almost all types of conveyances including air transport.

Most of the research reactors cannot receive heavy large-size containers on their sites. The use of Russian-made TUK-19 casks weighing up to 5 tons does not require significant upgrades to the research reactor (RR) equipment; moreover, analyses have shown that it is good for RR SNF shipments by all conveyances including air transport. So, a choice was made in favor of the TUK-19 casks for SFA transportation from the IFIN-HH Institute (Magurele, Romania).

The task implementation involved the following activities:

— develop an overpack for transportation of the TUK-19 packages by various conveyances;

— perform a safety analysis of the package design for air transportation;

— perform a safety analysis of the package shipment.

The project involved the consignor (FSUE "PA "Mayak"), the air carrier (Volga-Dnepr Airlines), the fabricator of the freight containers (Abakanvagonmash, JSC), the fabricator of TUK-19 tie-downs (Ozersk Non-Standard Equipment Plant, OJSC), the Russian Maritime Register of Shipping (RMRS), expert organizations (FSUE "RFNC — VNIIEF", FSUE "ETC SPb") and the developer of the technology and equipment (R&D Company "Sosny"). All the activities were performed under the auspices and control of nuclear and radiation safety and licensing department of Rosatom State Nuclear Energy Corporation. The customer was the National Commission for Nuclear Activities Control of Romania (CNCAN).

DEVELOPMENT OF OVERPACK

To ensure multi-modality of the shipment, an overpack was developed on the basis of a specialized freight large-capacity 20-foot ISO-container (the specialized ISO-container) that accommodates three TUK-19 casks. The specialized ISO-container meets ISO standards in terms of handling operations during transportation. As for strength characteristics, the specialized ISO-container satisfies industrial norms for

рованного грузового крупнотоннажного 20-футового ISO-контейнера (СГКК), в котором размещались три упаковки ТУК-19. С точки зрения обращения в процессе перевозки СГКК соответствовал требованиям ISO-стандартов. По прочности СГКК удовлетворял отраслевым нормам перевозки опасных грузов различными видами транспорта: воздушным, автомобильным, железнодорожным и морским. Упаковки ТУК-19 закреплялись в СГКК с помощью системы талрепов, способных выдержать ускорения и вибрации, характерные для всех видов транспорта.

Рис. 1. ТУК-19 в грузовом ISO-контейнере
Fig.1. TUK-19 in ISO-container

Комплект раскрепления для каждого ТУК-19 состоит из основания и четырех талрепов, которые нижним концом соединяются с кронштейнами, приваренными к полу СГКК, а верхним концом — с хомутом, охватывающим ТУК-19.

СГКК прошел экспертизу в Российском морском регистре судоходства на соответствие стандартам. После успешных испытаний на испытательных стендах, освидетельствованных регистром, получен сертификат-разрешение №08.11146.130 о допуске к перевозке грузов.

ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ КОНСТРУКЦИИ УПАКОВКИ

Российские (НП-053-04) и международные (TS-R-1) правила допускают воздушную перевозку радиоактивных делящихся материалов в транспортных упаковочных комплектах типа В с ограничением по активности. В связи с тем, что активность четырех самых «горячих» румынских ОТВС не превышала значения 3000 A_2 ($3000*10^{13}$ Бк), установленного правилами, было принято решение сертифицировать упаковку по типу В (U).

Наиболее сложной задачей оказалось доказательство сохранения подкритичности единичной упаковки при усиленной серии испытаний: на прокол (разрыв), усиленное тепловое воздействие и столкновение. В соответствии с требованиями правил, упаковки с делящимися материалами, предназначенные к перевозке воздушным транспортом, должны обеспечивать ядерную безопасность после двух серий дополнительных усиленных испытаний, имитирующих авиационные аварии. В связи с этим эксперты ВНИИЭФ провели расчетные исследования процесса динамического деформирования и оценку прочности упаковки ТУК-19 при воздействии механических нагрузок, моделирующих нормальные, а также нештатные условия перевозки включая авиационную аварию.

Результаты показали, что после воздействия на отдельную упаковку механических аварийных нагрузок (падения с высоты 9 м и на штырь с высоты 3 м, падения на упаковку тела массой 500 кг с высоты 9 м) исходная герметичность и прочность ТУК сохраняются. Обеспечиваются извлечение из ТУК чехла с ОТВС и последующая выемка сборок из чехла. При столкновении упаковки с жесткой преградой на скорости 90 м/с под многими углами происходит разрушение

transportation of hazardous cargoes by various conveyances, i.e. by air, road, rail and sea. The TUK-19 packages were fastened with turnbuckles capable of withstanding acceleration and vibrations typical of all types of conveyances.

A set of tie-downs for each TUK-19 cask consists of a supporting ring and four turnbuckles. With their lower ends the turnbuckles are connected to the brackets welded to the floor of the container, and with their upper end —to the clamp embracing the TUK-19 cask.

The specialized ISO-container was subject to expertise for compliance with standards at RMRS. After successful tests at test facilities certified by RMRS, the specialized ISO-container was allowed to ship cargoes with Certificate of Approval 08.11146.130.

JUSTIFICATION OF PACKAGE DESIGN SAFETY

Russian (NP-053-04) and international (TS-R-1) regulations allow for air transportation of radioactive fissile materials in Type B packagings with activity restrictions. Due to the fact that the activity of the "hottest" Romanian SFAs did not exceed 3000 A_2 ($3000*10^{13}$ Bq) specified in the regulations, it was decided to certify the package as Type B(U).

The most difficult task was to prove that an individual package remains subcritical under enhanced tests: a puncture (rupture), an enhanced thermal impact and a drop. The regulatory requirements state that the packages of fissile materials to be transported by air should ensure nuclear safety after two series of additional enhanced tests simulating an air crash. So, VNIIEF experts made calculations of the dynamic deformation and performed a safety analysis of the TUK-19 package under mechanical impacts simulating normal operating conditions and non-standard transport conditions including an air crash.

The results demonstrate that the package retains its initial strength and containment after an impact on an individual package under accident conditions (a drop from a height of 9 m, falling onto a bar from a height of 3 m, a drop of a 500 kg mass from a height of 9 m). After the tests the cask still allows removal of the SFA-containing basket and the SFAs from the basket. An impact onto a rigid target at a velocity of 90 m/s under different angles destructs the lid bolts. But the cask body (the radiation shield) retains its integrity, the basket and the SFAs get deformed and the SFAs and the fuel rods get destructed. In most cases the basket and the SFAs do not spill out of the cask. When deformed, the lid can get stuck in the TUK-19 body.

In compliance with the certification procedure currently used in the Russian Federation, experts of Nuclear Safety Department of SSC – IPPE performed an independent assessment of the package nuclear safety. In the worst case of an impact onto a rigid target K_{eff} is

болтового соединения крышки и корпуса. При этом целостность ТУК-19 (радиационной защиты) сохраняется, чехол и ОТВС деформируются, происходит разрушение ОТВС и твэлов. Выброса чехла с ОТВС из ТУК-19 в большинстве случаев не происходит. В процессе деформирования ТУК-19 возможно заклинивание его крышки в корпусе.

В соответствии с действующей в Российской Федерации процедурой оформления сертификатов-разрешений специалисты «ГНЦ РФ-ФЭИ» выполнили независимую оценку обеспечения ядерной безопасности упаковки. В наихудшем случае столкновения упаковки с жесткой преградой $K_{эфф}$=0,872±0,001, что не превышает значения, установленного правилами (0,95). Показано, что транспортирование ТУК-19 с ОТВС типа С-36 автомобильным и авиационным транспортом удовлетворяет требованиям ядерной безопасности, изложенным в правилах.

Поскольку максимальное суммарное остаточное тепловыделение в упаковке с четырьмя ОТВС составляло не более 9 Вт, температура на внешней поверхности ТУК-19 в нормальных условиях эксплуатации не превышала 40°С.

Результаты расчетных и измеренных уровней излучения от ТУК-19, загруженного четырьмя ОТВС с максимальными радиационными характеристиками, свидетельствуют, что в нормальных условиях перевозки мощность дозы излучения на поверхности упаковки (0,158 мЗв/ч) значительно меньше установленной правилами (2 мЗв/ч). Поскольку при аварии целостность радиационной защиты не нарушается, мощность дозы излучения на расстоянии 1 м от поверхности упаковки не будет превышать 0,038 мЗв/ч, что значительно меньше значения, установленного правилами (10 мЗв/ч).

Правила ограничивают пределы активности при утечке радиоактивного содержимого из упаковок. Для нормальных условий перевозки максимально допустимое значение составляет 10^{-6} A_2/ч, при авариях – 10xA_2 в неделю для ^{85}Kr и A_2 для всех других радионуклидов. Согласно расчетам, потери радиоактивного содержимого из ТУК-19 в обычных условиях перевозки за 1 ч могут составить 5,7x10^3 Бк, что соответствует примерно 0,06% от величины A_2 (1x10^{13} Бк), при аварии – не более 0,005%.

ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРЕВОЗКИ

При оценке радиационных рисков предполагалось, что ТУК-19 при перевозке ОЯТ является опасным производственным объектом, соответственно, использовалась нормативная документация для АЭС. Поэтому аварии с вероятностью выше 10^{-7} в расчете на один рейс в год рассматривались как проектные, с вероятностью ниже 10^{-7}, но выше 10^{-10} – как запроектные, при них может возникнуть необходимость принятия мер для защиты населения. Критерий вмешательства – 0,1 Зв; эта же величина выбрана в качестве максимального значения доз для персонала, участвующего в перевозке, при проектных авариях.

На рисунке 2 приведено дерево событий (чрезвычайных ситуаций) при авиаперевозке ОЯТ по маршруту Бухарест-Екатеринбург, при которых не исключаются радиационные аварии, а также вероятность возникновения таких ситуаций.

При нормальных условиях перевозки воздушным транспортом ОТВС в ТУК-19 обеспечивается безопасность и сопровождающего груз персонала, и населения.

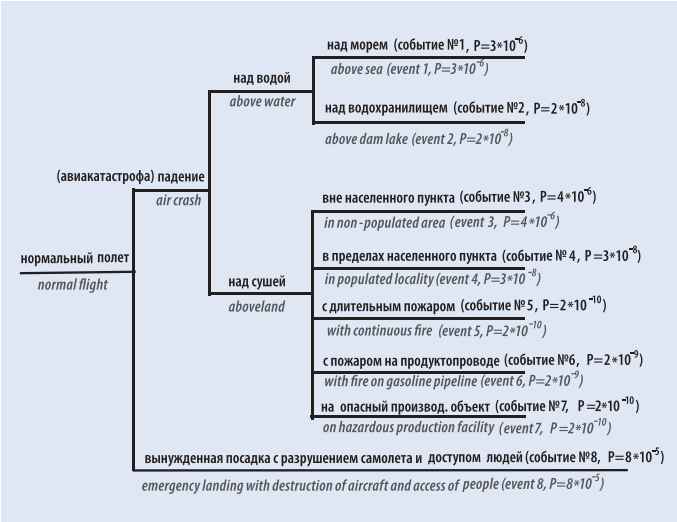

Рис. 2. Дерево возможных событий при авиаперевозке упаковок ТУК-19 с ОТВС реактора ВВР-С
Fig. 2. A tree of possible events during the air shipment of VVR-S reactor SFAs in TUK-19 casks

0.872±0.001 that does not exceed the regulated value of 0.95. Transportation of the TUK-19 casks containing S-36 SFAs by road and air was shown to satisfy nuclear safety regulatory requirements.

Since the maximum total residual heat release in the package containing four SFAs was less than 9 W, the temperature on the TUK-19 external surface under normal conditions did not exceed 40°C.

Calculated and measured radiation levels of the TUK-19 cask loaded with four SFAs with the maximum radiation characteristics demonstrate that under normal transport conditions the dose rate on the package surface (0.158 mSv/h) is much less than the allowable value (2 mSv/h). Since under accident conditions the radiation shield remains intact, the dose rate at a distance of 1 m from the package surface will not exceed 0.38 mSv/h that is much less than the allowable value (10 mSv/h).

The regulations set activity limits in case of a radioactive release from the package. Under normal transport conditions the maximum allowable value make up 10^{-6} A_2/h, under accident conditions – 10xA_2 per week for ^{85}Kr and A_2 for all other radionuclides. According to the calculations, the loss of the radioactive contents from the TUK-19 cask for 1 hour under normal transport conditions can make up 5.7x10^3 Bq that is equal to ~ 0.06% of the A_2 value (1x10^{13} Bq), and during an accident – not more than 0.005%.

TRANSPORT SAFETY JUSTIFICATION

In radiation risk assessments during an SNF shipment, the TUK-19 cask was taken as a hazardous production object; so, NPP norms and regulations were applied. The accidents with a probability higher than 10^{-7} in anticipation of one shipment per year were considered to be design-basis, and those with a probability less than 10^{-7}, but higher than 10^{-10} – beyond-design-basis (they can require public protective measures). The criterion for taking protective measures is 0.1 Sv; the same value is chosen as the maximum dose value for the personnel involved in the shipment and design-basis accidents.

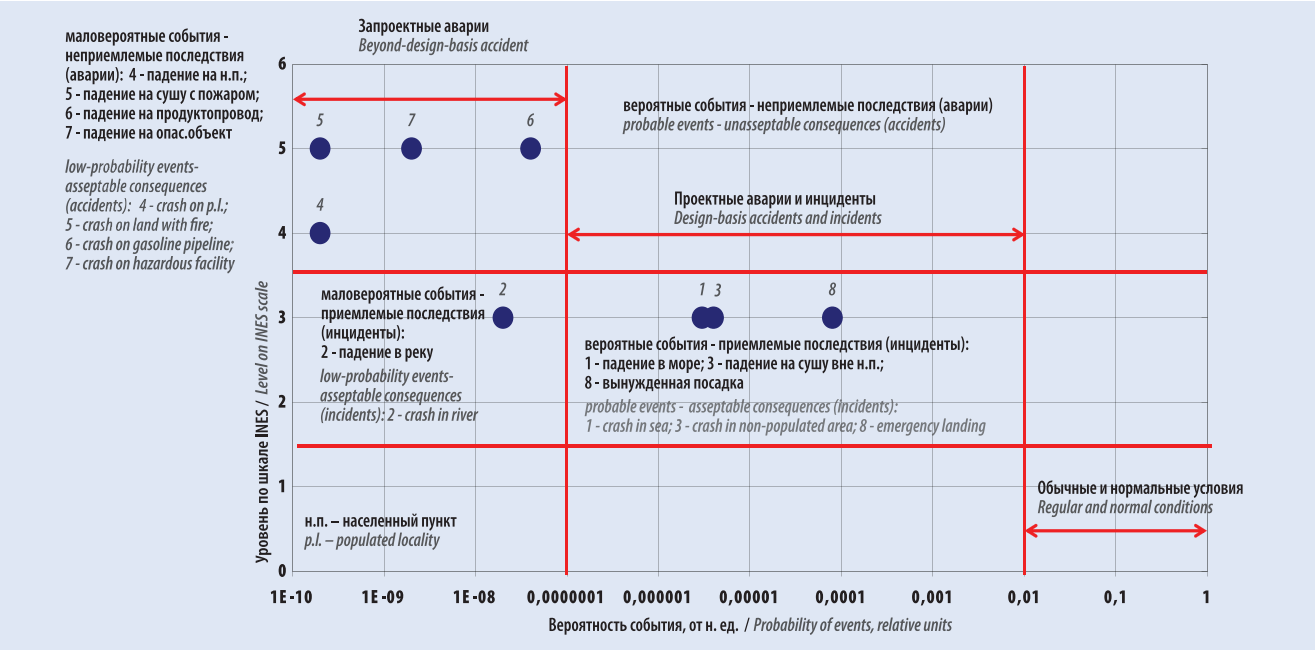

Рис. 3. Диаграмма «вероятность события – тяжесть последствий по шкале INES» для чрезвычайных ситуаций при авиаперевозке ТУК-19 с ОТВС реактора ВВР-С

Fig. 3. Probability of events – severity of consequences diagram for risk assessments during the air shipment of TUK-19 packages with VVR-S reactor SFAs

Соблюдение критериев приемлемого риска для персонала обеспечивается за счет особенностей упаковок ОЯТ и дозиметрического контроля, а для населения — за счет соблюдения требований правил.

При анализе чрезвычайных ситуаций установлено, что не существует вероятных событий ($P>1x10^{-7}$), которые могут быть расценены по шкале INES как аварии (рис. 3). Вероятные события (1, 3, 8) расцениваются как инциденты, а события с наиболее тяжелыми последствиями (4-7) маловероятны. Событие 2 и маловероятно, и не имеет серьезных последствий.

При разработке проекта большое внимание уделялось аварийной поддержке. При активном содействии АТЦ СПб была разработана аварийная карточка №7-02, определяющая первичные действия экипажа воздушного судна, сопровождающего персонала и аварийно-спасательных служб в случае аварии.

После завершения всех работ по обоснованию безопасности на конструкцию упаковки и перевозку был получен сертификат-разрешение №RUS/3104/B(U)F-96T.

***

Вечером 29 июня 2009 года автоколонна с транспортными пакетами покинула территорию института IFIN-HH и под охраной направилась в сторону аэропорта Бухареста, где контейнеры были загружены в самолет АН-124-100. Маршрут полета проходил в обход крупных населенных пунктов и опасных производственных объектов, во избежание пересечения воздушного пространства третьих стран – над Черным морем. После промежуточной посадки в Ульяновске самолет благополучно приземлился в аэропорту «Кольцово», откуда груз автомобильным транспортом был доставлен на ПО «Маяк».

Проект вывоза ОЯТ реактора ВВР-С из Румынии показал, что перевозка упаковок ОЯТ с ограниченной активностью с использованием воздушного транспорта и возможна, и безопасна.

Fig. 2 presents a tree of events (emergencies) during the SNF shipment from Bucharest to Ekaterinburg that include accidents and a probability of emergencies.

Under normal air transport conditions, the SFA-containing cask ensures safety of both the escort personnel, and the population. The acceptable risk criterion for the escort personnel is satisfied due to the SNF package peculiarities and radiation monitoring, and for the population — due to observance of regulatory requirements.

The analysis of emergencies shows that there are no probable events ($P>1x10^{-7}$) that can be assessed as accidents on the INES scale (Fig. 3). Probable events (1, 3, 8) are considered to be incidents, and events with harder consequences (4-7) are low probable. Event 2 is unlikely and do not have serious consequences.

In design, particular attention was paid to emergency response actions. With ETC SPb actively involved, Emergency Card 7-02 was developed to specify primary actions of the aircraft crew, the escort personnel and emergency response services in case of an accident.

Certificate of Approval for Package Design and Shipment RUS/3104/B(U)F-96T was issued after all safety justification activities.

***

In the evening on 29 June 2009, a guarded vehicle convoy with overpacks left the IFIN-HH site and headed to the airport of Bucharest, where the containers were loaded into an AN-124-100 aircraft. The flight track passed by large populated localities and hazardous production facilities, and it lied over the Black Sea to avoid crossing of the airspace of third countries. After an refueling stop in Ulyanovsk, the aircraft successfully landed at the Koltsovo airport, from where the consignment was delivered to PA “Mayak”.

The Romanian VVR-S reactor SNF removal project demonstrated that air transportation of SNF packages with limited activity is feasible and safe.