ПОДГОТОВКА ПЕРВОЙ АВИАПЕРЕВОЗКИ ОЯТ, СЕРТИФИЦИРОВАННОЙ ПО НОВЫМ ПРАВИЛАМ

PREPARATION OF THE FIRST AIR TRANSPORT OF SPENT FUEL CERTIFIED TO NEW REQUIREMENTS

О.П. БАРИНКОВ,
Б.А. КАНАШОВ,
С.В. КОМАРОВ
(ООО НПФ «Сосны»),
А.Е. БУЧЕЛЬНИКОВ
(Госкорпорация «Росатом»),
В.И. ШАПОВАЛОВ, *к.т.н.,*
А.И. МОРЕНКО
(ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»)

O.P. BARINKOV,
B.A. KANASHOV,
S.V. KOMAROV
(R&D Company Sosny),
A.E. BUCHELNIKOV
(Rosatom Corporation),
V.I. SHAPOVALOV, *Candidate of Technical Science,*
A.I. MORENKO
(VNIIEF Research Institute of Experimental Physics)

■ В ходе реализации проекта по вывозу ОТВС румынского реактора ВВР-С возникла потребность в использовании воздушного транспорта. Российским специалистам пришлось приложить значительные усилия сначала для обоснования безопасности такой перевозки, а потом и для ее организации.

Идея транспортирования ОЯТ по воздуху не нова. В 1993-1994 годах состоялись две перевозки ОЯТ исследовательского реактора ИРТ-5000 из Ирака (Tuwaitha Nuclear Research Centre – TNRC) в Россию (ПО «Маяк»). Всего было вывезено 208 ОТВС, содержащих чуть менее 100 кг урана, в том числе и высокообогащенного. Вывоз осуществлялся в американских контейнерах NAC-LWT (NAC International) на российском воздушном судне АН-124-100. Обстановка, при которой происходила данная операция, была чрезвычайной. Реактор ИРТ-5000 был разрушен в течение первых дней войны 1991 года, но приреакторный бассейн, в котором хранилась часть ОТВС, и сами сборки не были повреждены. Тем не менее, бассейн был завален строительными конструкциями здания реактора. Остальные ОТВС хранились в другом месте (Garf al Naddaf district), расположенном в 5 км от TNRC и не приспособленном для обращения с отработавшим топливом. Фактически ОТВС были размещены в бетонных бункерах, которые, в свою очередь, были погребены в котловане, вырытом на открытой местности.

Подобные условия хранения ОЯТ, опасность несанкционированного распространения делящихся материалов и политическая ситуация в стране требовали немедленного удаления ОЯТ из Ирака. Как того требовали международные соглашения, ОЯТ нужно было вернуть в страну происхождения – в Россию. Единственным видом транспорта, способным удовлетворить требованиям чрезвычайности, был воздушный. Международные нормативные правила, регулирующие перевозки ОЯТ в те годы, не накладывали ограничений на использование воздушного транспорта для перевозки материалов с высокой активностью. При перевозке руководствовались «Основными пра-

■ During the implementation of the project to remove the spent fuel assemblies from the Romanian VVR-S reactor it became necessary to use air transport for that purpose. The Russian specialists had to go great lengths to first justify the safety of such transport, and then to make sure it actually happens.

The idea to transport spent fuel by air is not itself new. In 1993-1994, two transports of spent fuel took place from the IRT-5000 research reactor in Iraq (Tuwaitha Nuclear Research Centre – TNRC) to Russia (Mayak). A total of 208 SFAs were repatriated, containing a little less than 100 kg of uranium, including some highly-enriched. The fuel was moved using the American NAC-LWT (NAC International) casks on board a Russian AN-124-100 aircraft. The circumstances surrounding that fuel transport were extraordinary. The IRT-5000 reactor had been hit and destroyed during the first few days of the 1991 war, but the nearby fuel cooling pool, which contained some of the SFAs, and the assemblies themselves had not been damaged. Nonetheless, the pool was covered with debris from the destroyed reactor building. The remaining SFAs were stored in a different location (in Garf al Naddaf district), 5 kilometres from the TNRC, which was not suitable for management of spent nuclear fuel. The SFAs were actually placed into concrete bunkers, which were in their turn buried in an open-ground pit.

Such conditions of spent fuel storage, along with the danger of unauthorised dissemination of fissionable materials and difficult political situation in the country called for immediate action to take that spent fuel out of Iraq. As required by the international agreements, the spent fuel had to go back to its country of origin, i.e. to Russia. The only mode of transport that would satisfy all emergency and urgency requirements of the situation was air. International regulations pertaining to spent fuel transport at the time did not impose any limitations on utilisation of air transport for transportation of highly radioactive materials. The primary provisions for transport were those of the "Main safety and physical protection regulation for transport of nuclear materials" (OPBZ-83) and the Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (IAEA, 1985).

вилами безопасности и физической защиты при перевозке ядерных материалов» (ОПБЗ-83) и «Правилами безопасной перевозки радиоактивных материалов» (МАГАТЭ, 1985 год).

Последствия аварий на воздушном транспорте значительно более тяжелые, чем на наземных и водных видах транспорта, поэтому в правила МАГАТЭ TS-R-1 издания 1996 года были введены более строгие требования к упаковкам, предназначенным для перевозки делящихся материалов по воздуху. В частности, в этом документе появились требования ограничения активности содержимого упаковки и подкритичности отдельной упаковки после усиленной серии испытаний. Более поздние правила МАГАТЭ 2005 года подтвердили это требование. Для материала неособого вида был установлен предел активности $3000A_2$, принимая во внимание выполненный ранее анализ рисков [1].

Транспортирование ОТВС из Румынии в РФ не являлось чрезвычайной операцией. Тем не менее, на момент выполнения проекта проблемы наземного транзитного транспортирования через третьи страны не были решены. В связи с этим возникло предложение осуществить вывоз ОТВС из Румынии с использованием воздушного транспорта. Участники первого совещания, которое состоялось 2 марта 2006 года в Москве, убедились, что активность всех 70 ОТВС типа С-36 румынского реактора ВВР-С (~25 кг урана) на момент перевозки не превышает установленного правилами НП-053-04 и TS-R-1 значения $3000A_2$. Следовательно, перевозка этих ОТВС могла быть осуществлена воздушным транспортом в упаковках типа B(U) [2].

Для решения поставленной задачи было необходимо:

– разработать транспортный пакет, обеспечивающий перевозку упаковок ТУК-19 различными видами транспорта, в том числе воздушным;

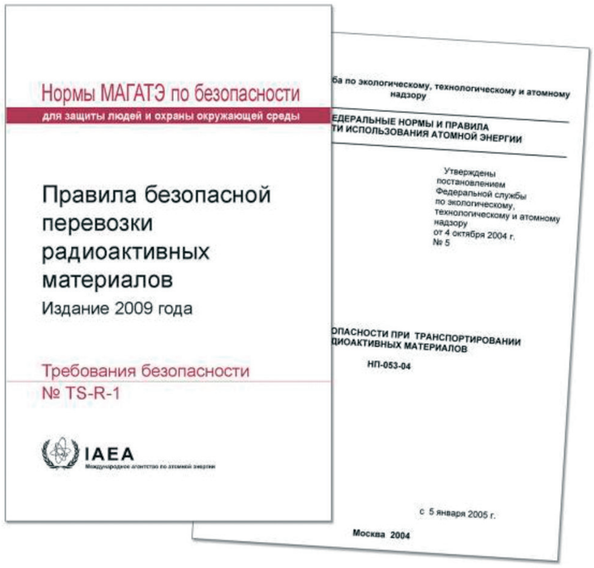
– продемонстрировать возможность загрузки транспортного пакета в самолет АН-124-100;

– обосновать безопасность конструкции упаковки;

– обосновать безопасность самой перевозки.

РАЗРАБОТКА ТРАНСПОРТНОГО ПАКЕТА

Для перевозки ОЯТ реактора ВВР-С был выбран российский цельнометаллический контейнер ТУК-19. Чтобы обеспечить мультимодальность перевозки, был разработан транспортный пакет на основе специализированного грузового крупнотоннажного 20-футового ISO-контейнера (СГКК), в котором размещались три контейнера ТУК-19. По прочности СГКК должен удовлетворять 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. СГКК прошел экспертизу в Российском морском регистре судоходства (РМРС) на соответствие требованиям стандартов. После успешных испытаний на испытательных стендах, освидетельствованных РМРС, 17 апреля 2008 года был получен сертификат-разрешение №08.11146.130 о допуске СГКК к перевозке грузов.



Международные и российские правила безопасности перевозок
The IAEA TS-R-1 regulation and russian NP-053-040

Potential consequences of an air transport accident are far more severe than on land or sea transport, as a result of which the 1996 edition of the IAEA TS-R-1 regulation was amended to include stricter requirements applicable to packages that are intended for transport of fissionable materials by air. In particular, the document came to feature requirements regarding the limitation of radioactivity content in the package and subcriticality of a single package after a series of extended tests. The later, 2005 edition of this IAEA regulation confirmed the validity of those provisions. For a non-specific type of material, the activity limit of $3000A_2$ was set, taking into consideration the previously performed risks analysis [1].

Transportation of SFAs from Romania to the Russian Federation was not, however, an emergency operation. Nonetheless, as of the time of the project the arrangements necessary for overland transport through third countries were not in place. In connection with this, a suggestion was put forward to repatriate the SFAs from Romania using air transport. Attendees to the first meeting on the 2nd March 2006 in Moscow were provided with evidence that the activity levels of all 70 S-36 SFAs available at the Romanian VVR-S reactor (~25 kg of uranium) at the time of transport would not exceed the $3000A_2$ limit stipulated by the NP-053-04 and TS-R-1. Accordingly, these SFAs were suitable for transport by air in type B(U) packages [2].

For the task to be completed, the following needed to be performed:

– develop a transport package that would support the transport of TUK-19 casks by various types of transport, including air;

– demonstrate the possibility of loading that transport package on board the AN-124-100 aircraft;

– prepare a safety justification for the package design;

– prepare a safety justification for the transportation process itself.

TRANSPORT PACKAGE DEVELOPMENT

For the purposes of transport of the VVR-S spent fuel, the Russian wholly-metallic TUK-19 cask was selected. In order to

Демонстрация загрузки транспортного пакета в аэропорту Челябинска
Transport package demonstration loading at a Chelyabinsk airfield

21 августа 2008 года в аэропорту города Челябинска состоялась успешная демонстрация возможности загрузки транспортного пакета в самолет АН-124-100.

ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ КОНСТРУКЦИИ УПАКОВКИ

Наиболее сложной задачей оказалось доказательство сохранения подкритичности единичной упаковки при усиленной серии испытаний: на прокол (разрыв), усиленное тепловое испытание и на столкновение. В соответствии с требованиями российских и международных 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 экспертами РФЯЦ-ВНИИЭФ были проведены расчетные исследования процесса динамического деформирования и оценки прочности упаковки ТУК-19 при воздействии механических нагрузок, моделирующих нормальные условия эксплуатации, а также нештатные условия перевозки, включая авиационную аварию.

Результаты расчетов показали, что после воздействия на отдельную упаковку механических аварийных нагрузок (падение с высоты 9 м, падение на упаковку тела массой 500 кг с высоты 9 м, падение на штырь с высоты 3 м) сохраняется исходная герметичность и прочность ТУК, обеспечивается извлекаемость чехла с ОТВС из ТУК и последующее извлечение ОТВС из чехла.

При столкновении отдельной упаковки с жесткой преградой на скорости 90 м/с в большом диапазоне углов происходит разрушение болтового соединения крышки и корпуса ТУК. При этом целостность ТУК (его радиационной защиты) сохраняется, чехол и ОТВС деформируются, происходит разрушение ОТВС и твэлов. Выброс чехла с ОТВС из корпуса ТУК в большинстве случаев столкновения с жесткой преградой отсутствует. В процессе деформирования ТУК возможно заклинивание его крышки в корпусе контейнера.

Специалисты отдела ядерной безопасности ГНЦ РФ – ФЭИ выполнили независимую оценку обеспечения ядерной безопасности упаковки для наихудших случаев столкновения упаковки с жесткой преградой и показали, что транспортирование упаковки ТУК-19 с румынскими ОТВС авиационным транспортом удовлетворяет требованиям ядерной безопасности, изложенным в НП-053-04 и TS-R-1.

Результаты расчетных и измеренных уровней излучения для ТУК-19, загруженного четырьмя ОТВС с максимальными радиационными характеристиками, в нормальных условиях перевозки подтвердили, что мощность дозы излучения на поверхности упаковки

ensure that the transport can be performed in multiple modes, a dedicated transport package was developed on the basis of the specialised heavy-duty 20-foot ISO cargo container, with each accommodating three TUK-19 casks. The structural properties of the cargo container had to meet the requirements of the industry transport regulations for dangerous cargoes by various modes of transport: air, automobile, rail and sea. The TUK-19 casks were to be secured inside the cargo container by a system of buckles, capable of withstanding the accelerations and vibrations characteristic of all these types of transport. The properties of the cargo container were subjected to extensive review by the Russian Registrar of Shipping for compliance with the requirements of applicable standards. After successful rig tests witnessed by representatives of the Registrar of Shipping, on the 17th April 2008 a certificate-permit was issued, ref. No. 08.11146.130, permitting the use of this cargo container for transport purposes.

On the 21st August 2008, an airfield near the Russian city of Chelyabinsk became the location of a successful demonstration of feasibility of this transport package loading into the AN-124-100 aircraft.

PACKAGE SAFETY JUSTIFICATION

The most difficult of tasks, however, was demonstration of subcriticality of a single package subjected to an extensive series of tests: piercing (breach) test, extended thermal test and collision test. In accordance with the requirements of Russian and international codes, packages containing fissionable materials and intended for transport by air must still be able to ensure nuclear safety after two series of extended tests that simulate the conditions of an airplane crash.

In this connection, VNIIEF experts performed a range of calculations to study the process of dynamic deformation and assess structural strength of the TUK-19 package when subjected to mechanical loadings characteristic of normal operating conditions, as well as abnormal conditions of transport, including an airplane crash.

The results of the calculations demonstrated that a single package, when subjected to accidental mechanical loadings

(0,158 мЗв/ч) значительно меньше установленной правилами (2 мЗв/ч).

Поскольку в аварийных условиях перевозки целостность радиационной защиты не нарушается, был сделан вывод о том, что мощность дозы излучения на расстоянии 1 м от поверхности упаковки не будет превышать 0,038 мЗв/час, что также намного меньше значения, установленного правилами (10 мЗв/час).

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 расчетов показали, что потери радиоактивного содержимого из ТУК-19 для нормальных условий перевозки за 1 ч (а для аварийных – за неделю) меньше предела, установленного правилами.

ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРЕВОЗКИ

По инициативе отдела ядерной безопасности ГНЦ РФ – ФЭИ был проведен анализ радиационных рисков. Аварии с вероятностью выше 10^{-7} в расчете на один рейс в год рассматривались в качестве проектных, при вероятности ниже 10^{-7}, но выше 10^{-10} в расчете на один рейс в год – как запроектные (при которых может возникнуть необходимость принятия мер для защиты населения).

Было исследовано дерево событий (чрезвычайных ситуаций) применительно к условиям авиаперевозки ОЯТ по маршруту Бухарест–Екатеринбург, при которых, в принципе, не исключаются радиационные аварии, а также вероятности возникновения таких ситуаций.

Из результатов анализа следовало, что при нормальных условиях перевозки воздушным транспортом ОТВС в ТУК-19 обеспечивается безопасность и персонала, участвующего в перевозке ОЯТ, и населения.

При анализе чрезвычайных ситуаций было установлено, что не существует вероятных событий ($P>1*10^{-7}$), которые могут быть расценены по шкале INES как аварии. Наиболее вероятные события по этой шкале харак-

Разрешительные документы / *Certificates and approvals*

Последствия аварий на воздушном транспорте значительно более тяжелые, чем на наземных и водных видах транспорта, поэтому в правила МАГАТЭ TS-R-1 издания 1996 года были введены более строгие требования к упаковкам, предназначенным для перевозки делящихся материалов по воздуху. В частности в этом документе появились требования ограничения активности содержимого упаковки и подкритичности отдельной упаковки после усиленной серии испытаний. Более поздние правила МАГАТЭ 2005 года подтвердили это требование.

Potential consequences of an air transport accident are far more severe than on land or sea transport, as a result of which the 1996 edition of the IAEA TS-R-1 regulation was amended to include stricter requirements applicable to packages that are intended for transport of fissionable materials by air. In particular, the document came to feature requirements regarding the limitation of radioactivity content in the package and subcriticality of a single package after a series of extended tests. The later, 2005 edition of this IAEA regulation confirmed the validity of those provisions.

(9 metres drop; impact by a 500 kg body falling from 9 metres; 3 metres drop onto a rod), would still retain its containment and integrity, assuring retrievability of the basket with SFAs from the package and retrievability of the SFAs from the basket.

When a single package moving at 90 metres/sec collides with an unyielding obstacle, within a large range of angles the bolted connection between the package body and lid gets destroyed. At the same time, the integrity of the package shielding would be retained, the basket and the SFAs would deform, and the SFAs and fuel rods would be destroyed. In the majority of cases of collision with an unyielding obstacle there would be no release of the SFAs-containing basket from the overpack cavity. In the process of package body deformation its lid may become stuck in its body.

Specialists from the nuclear safety department of the Leipunsky Institute of Physics and Power Engineering performed an independent assessment of whether nuclear safety of the packages would be ensured under the most penalising circumstances of the package hitting an unyielding obstacle, which demonstrated that the TUK-19 transport packages loaded with the Romanian SFAs and transported by air would meet the nuclear safety requirements as per NP-053-04 and TS-R-1.

The results of computed and measured radiation levels for the TUK-19 package loaded with four SFAs with the highest radiation source properties in normal conditions of transport have confirmed that the dose rate at the surface of the package (0.158 mSv/hour) is well within the regulatory limit (2 mSv/hour).

As in accidental conditions of transport the shielding would still remain integral, it was concluded that the dose rate at 1 metre from the package surface would not exceed 0.038 mSv/hour, which is also far below the regulatory value (10 mSv/hour).

As the maximum total residual heat release per package containing four SFAs would not be greater than 9 W, the tem-

Самолет АН-124-100 / *AN-124-100 aircraft*

теризовались как инциденты, а события с наиболее тяжелыми последствиями (аварии) оказались маловероятными. Несколько исследованных событий были и маловероятны, и не имели серьезных последствий (инцидент) [2].

Большое внимание при реализации перевозки ОЯТ из Румынии уделялось аварийной поддержке. При активном содействии АТЦ СПб была разработана аварийная карточка №7-02, которая устанавливала первичные действия экипажа воздушного судна, сопровождающего персонала и аварийно-спасательных служб в случае аварии.

После завершения всех работ по обоснованию безопасности 13 февраля 2009 года был получен сертификат-разрешение №RUS/3104/B(U)F-96T на конструкцию упаковки и перевозку.

***

Вывоз ОЯТ реактора ВВР-С из Румынии в российских контейнерах ТУК-19 с использованием воздушного транспорта, несомненно, был амбициозным проектом. Однако высокие цели, которые поставили перед собой участники проекта, с неизбежностью заставили главное внимание уделять вопросам обеспечения безопасности. Проект в течение трех лет находился под особым надзором российских и румынских компетентных и регулирующих органов и сопровождался ими от самого начала до завершения. Результаты работ по обоснованию безопасности, выполняемых при подготовке к перевозке, широко обсуждались экспертами и специалистами отрасли на внутрироссийских и международных совещаниях.

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

Литература / References:

1. *Hubert P., et al. Specification of Test Criteria and Probabilistic Approach: The Case of Plutonium Air Transport Probabilistic Safety Assessment and Risk Management, PSA 87,Verlag TUV Rheinland, Cologne (1987).*
2. *Комаров С.В. Транспортирование ОЯТ по воздуху: обоснование безопасности / С.В. Комаров, Б.А. Канашов, О.П. Баринков, А.Н. Дорофеев // Безопасность окружающей среды. – 2010. – №1. – С.42-45.*

perature on the external surface of TUK-19 in normal conditions of operation would not exceed 40°C.

Calculation results have demonstrated that the release of radioactivity from the TUK-19 in normal conditions of transport over 1 hour (and over one week in accidental conditions) would be within the regulatory limit.

SAFETY JUSTIFICATION OF TRANSPORT

Initiated by the nuclear safety department of the Leipunsky Institute of Physics and Power Engineering, analysis of radiation risks was performed. Accidents with probability in excess of 10^{-7} as computed for one trip a year were considered to be design-basis, and with probability below 10^{-7} but above 10^{-10} for one trip a year were considered beyond design (i.e. such that may require measures to protect the public to be undertaken).

A study was undertaken of the tree of events (incidents) applicable to the conditions of spent fuel transport by air from Bucharest to Yekaterinburg, which would not, essentially, rule out radiation accidents, as well as the probabilities for such accidents to occur.

As follows from the results of that analysis, under normal conditions of transport by air of SFAs inside the TUK-19, safety would be ensured of both the personnel involved with this transport of spent fuel, and of the general public.

Analysis of accidents established that there are no credible events ($P>1*10^{-7}$) that would fall into the 'accident' category according to the INES scale. The most probable events would be characterised as 'incidents' according to that scale, with events with the most severe consequences (accidents) turning out to have a low probability. Several studied events were both low-probability and without any severe consequences (incident) [2].

Much attention during the transport of spent fuel from Romania was paid to emergency response support. With active involvement of the Saint Petersburg accident response centre, the emergency-response action card No. 7-02 was issued, which provided instructions regarding the immediate response actions by the aircraft crew, escort personnel and rescue teams in case of an accident.

After the completion of all the necessary safety justifications, on the 13th February 2009, the certificate-permit ref. No. RUS/3104/B(U)F-96T was issued, covering both the package design and the transport process.

***

The transport of spent VVR-S fuel from Romania to Russia using the TUK-19 casks by air transport was, undoubtedly, a highly ambitious project. However, the high goals that the project team had set out to achieve had inevitable made them focus on safety assurance above anything else. The project had for three years remained in the spotlight of attention of the Russian and Romanian competent authorities and regulatory bodies, and was supervised by them very thoroughly beginning-to-end. The results of safety justifications produced as part of the preparations for this transport were the subject of extensive discussions in the nuclear industry community both within Russia and internationally.

The spent VVR-S fuel repatriation project from Romania has demonstrated that air transport of spent fuel packages with limited activity levels is both feasible and safe.