

ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ НЕКОНДИЦИОННОГО ОЯТ РБМК С ЛЕНИНГРАДСКОЙ АЭС НА ПЕРЕРАБОТКУ НА ФГУП «ПО «МАЯК»

TRANSPORT OF NON-CONFORMING SPENT RBMK FUEL FROM LENINGRAD NPP TO MAYAK FOR TREATMENT

Б.А. КАНАШОВ,
А.Н. ДОРОФЕЕВ, к.т.н.,
В.П. СМІРНОВ, д.т.н.
(ООО НПФ «Сосны»),
А.В. ХАПЕРСКАЯ,
Е.Г. КУДРЯВЦЕВ, к.х.н.
(Госкорпорация «Росатом»),
Н.Н. КАЛЯЗИН,
И.Н. ЛОЖНИКОВ (Ленинградская АЭС)

B.A. KANASHOV,
A.N. DOROFYEV, Candidate of Technical Science,
V.P. SMIRNOV, Doctor of Technical Science
(Sosny Research and Development Company),
A.V. KHAPERSKAYA,
E.G. KUDRYAVTSEV, Candidate of Chemical Science
(Rosatom Corporation),
N.N. KALYAZIN,
I.N. LOZHNIKOV (Leningrad NPP)

14 января 2011 года по инициативе Госкорпорации «Росатом» руководство ОАО «Концерн Росэнергоатом» приняло решение о реализации «пилотного» проекта по вывозу некондиционных ОТВС со второго энергоблока Ленинградской АЭС на ФГУП «ПО «Маяк». Основная цель проекта – решение вопроса о целесообразности переработки ОЯТ РБМК и подтверждение принципиальной возможности его перевозки и переработки.

As initiated by Rosatom, on 14 January 2011 the management of Rosenergoatom (Russia's operating utility) made the decision to commence the implementation of a "pilot" project to move sub-standard spent fuel assemblies from Leningrad Unit 2 to Mayak. The primary objective of the project was to determine whether it is economically reasonable to reprocess spent RBMK fuel and to confirm that it can in principle be transported and reprocessed.

В течение длительного времени среди специалистов отрасли бытовало устойчивое мнение, что переработка ОЯТ реакторов РБМК нецелесообразна. Этот тезис обосновывался тем, что исходное обогащение топлива РБМК по ^{235}U было небольшим (максимум 2%), а цены на уран – невысокими, при этом текущие потребности в уране покрывали другие источники. Сегодня ситуация изменилась: обогащение топлива по ^{235}U достигает 2,8%, а цены на уран возросли в несколько раз.

For a long time, the prevailing view in the industry was that reprocessing of spent fuel generated by RBMK reactors is not viable. This proposition was based upon the following facts: the initial enrichment of RBMK fuel is small (2% of ^{235}U at most), the current uranium prices are low and the current uranium demand is provided by other sources. Today, however, the situation is different: initial enrichment of the fuel may be as high as 2.8% of ^{235}U , with uranium prices having gone up multi-fold.

Кроме того, существовала еще одна серьезная причина для реализации данного проекта. В отличие от кондиционного ОЯТ РБМК, которое в соответствии с концепцией Госкорпорации «Росатом» должно быть переведено в режим длительного «сухого» хранения, судьба некондиционного ОЯТ до сих пор не определена. И для принятия решения о его перевозке и переработке на регулярной основе требовались веские основания.

In addition, there was another important reason for launching of the project. Unlike "good" spent RBMK fuel, which according to the Rosatom's SNF strategy is to be placed in long-term "dry" storage, the future of sub-standard spent fuel remains open. Furthermore, solid justification was required for its regular transportation and reprocessing.

Для реализации «пилотного» проекта необходимо было решить несколько технических задач, таких как:

In order to implement the "pilot" project, a number of technical problems needed resolution, such as:

- выбор ОТВС для опытной партии;
- выбор контейнера и разработка компонентов упаковки для перевозки опытной партии некондиционных (в первую очередь, негерметичных) ОТВС;
- разработка технологии и оборудования для разделки ОТВС и загрузки пучков твэлов (ПТ) в контейнер на Ленинградской АЭС;

- selection of SFAs for the pilot batch;
- choice of transport cask and development of package components for transport of the pilot batch of sub-standard (primarily leaky) SFAs;
- development of technological process and equipment for SFAs cutting and loading of fuel bundles into the cask on Leningrad NPP site;
- development of technological process and equipment for fuel bundles handling at Mayak.

– разработка технологии и оборудования для обращения с ПТ на ФГУП «ПО «Маяк».

Кроме того, необходимо было решить научные задачи, связанные с обоснованием безопасности обращения с некондиционным ОЯТ, и получить соответствующие разрешительные документы. В течение 2011 года эти задачи были успешно решены, и в ноябре 2011 года были осуществлены перевозка и переработка опытной партии некондиционных ОТВС РБМК.

ВЫБОР ОТВС ОПЫТНОЙ ПАРТИИ

К некондиционному ОЯТ реакторов РБМК относятся ОТВС, непригодные для длительного «сухого» хранения. В основном это досрочно выгруженные и не достигшие проектного выгорания ОТВС, содержащие достаточно высокий процент ²³⁵U. К этому же типу ОТВС реактора РБМК относятся ОТВС, получившие повреждения в процессе транспортно-технологических операций после извлечения из активной зоны. Однако для «пилотного» проекта был выбран тип ОТВС, наиболее сложный в обращении: все ОТВС опытной партии были выгружены из активной зоны вследствие негерметичности. Кроме того, по результатам настоящих тестов активность ¹³⁷Cs в воде пенала превышала 10⁻⁴ Ки/л, что свидетельствовало о контакте топливных таблеток с водой и, соответственно, о наличии воды под оболочкой хотя бы одного твэла. Ранее негерметичные ОТВС РБМК только в единичных случаях перевозились на послереакторные исследования.

К перевозке были отобраны восемь ОТВС. Это количество определялось необходимостью обеспечения однократной загрузки аппарата-растворителя на перерабатывающем заводе ФГУП «ПО «Маяк». Конструкция ОТВС – штатная, с закреплением твэлов в концевых решетках на концах сборки. Обогащение топлива по ²³⁵U составило 2,4% (наиболее типичное значение для большинства ТВС РБМК-1000). Выгорание топлива находилось в пределах 7,8-20,5 МВт*сут/кгU, то есть меньше, чем проектное (21,8 МВт*сут/кгU) для выбранного исходного обогащения. Время выдержки – 13,8-16,5 лет – определялось, исходя из соображений радиационной безопасности.

Для обоснования безопасности перевозки и анализа целесообразности дальнейшего использования регенерированного урана из ОЯТ РБМК-1000 были выполнены расчеты нуклидного состава и активности источников α-, β-, γ- и нейтронного излучения, включая вклад нейтронов за счет (α,n)- и (γ,n)-реакций. Особое внимание уделялось расчету содержания четных изотопов ²³²U и ²³⁶U, которые оказывают влияние на качество регенерата.

ВЫБОР КОНТЕЙНЕРА И РАЗРАБОТКА КОМПОНЕНТОВ УПАКОВКИ

Для «пилотного» проекта был выбран вариант, предусматривающий использование хорошо зарекомендовавшего

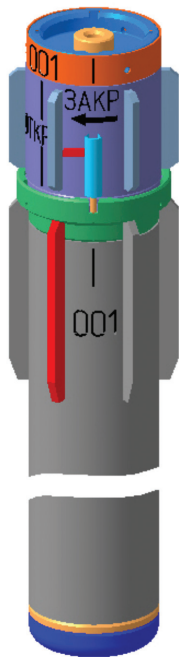


Рис. 1. Ампула для перевозки негерметичных ОТВС реактора РБМК
Fig. 1. Ampoule for transport of leaky RBMK fuel

In addition, certain scientific issues had to be addressed associated with the development of safety justifications for management of sub-standard spent fuel, and the necessary permits had to be obtained. During 2011, these objectives were successfully achieved, and in November 2011, a pilot batch of sub-standard spent RBMK fuel assemblies were successfully transported and processed.

SELECTION OF A PILOT FUEL BATCH

The category of sub-standard spent RBMK fuel includes those SFAs that are not suitable for long-term dry storage. These were mainly discharged from the core prematurely, i.e. before they could reach their design levels of burn-up, and thus they contain a relatively high percentage of ²³⁵U. This category also covers those SFAs that became damaged during transfer and handling operations performed after the discharge from the core. However, the SFAs chosen for the "pilot" project were the ones most difficult to handle: all SFAs in the pilot batch were discharged from the core because they had developed a leak. In addition, sipping tests performed on the SFAs demonstrated ¹³⁷Cs activity levels in thimble water in excess of 10⁻⁴ Ci/litre, evidencing that contact between water and the fuel pellets had occurred, which accordingly meant that there was water present inside at least one of the fuel rods. Previously, there had only been a few isolated cases of non-leaktight spent RBMK fuel assemblies being transported for post-core research purposes.

In total, eight SFAs were chosen for transportation. This number was determined based on a single loading of the dissolver at the Mayak reprocessing facility. The SFAs were of the standard design, with fuel rods attached to end grids on the SFAs. Enrichment of the assemblies was 2.4% of ²³⁵U (the most typical value for the majority of RBMK-1000 assemblies). Fuel burn-up was within 7.8-20.5 MW*day/kgU, i.e. less than the design level (21,8 MW*day/kgU) for the selected initial enrichment. The duration of post-core cooling – 13.8-16.5 years – was chosen based on radiation safety considerations.

In order to justify the safety of transport and analyse the viability of subsequent recycling of uranium recovered from spent RBMK-1000 fuel, nuclide composition and source term calculations were performed to determine the properties of α-, β-, γ- and neutron radiation, including the contributions of (α,n)- and (γ,n)-reactions towards neutron emissions. Particular attention was paid to calculations made to determine the content of even-numbered ²³²U and ²³⁶U isotopes, which influence the quality of the recycled material.

CASK SELECTION AND DEVELOPMENT OF PACKAGE COMPONENTS

The option chosen for the "pilot" project was based on the well-proven TUK-11 cask with basket "12". Another argument in favour of using this overpack was its availability (seven TUK-11s and 14 baskets "12" are available) and acceptability for Mayak.

It should, however, be noted that regardless of the type of cask, the main problem for transport of sub-standard SFAs that contain water-logged fuel rods after long-term wet cooling is assurance of explosion and fire safety of the package. And although drying of leak-tight fuel is currently feasible, dehydration of leaky fuel rods is still a technically difficult task.

Accordingly, the decision was made to transport the sub-standard SFAs containing defective fuel bundles inside sealed thin-walled ampoules (fig. 1), whose design would allow for

го себя ТУК-11 с чехлом 12. Дополнительным аргументом в пользу данного упаковочного комплекта стало достаточное количество (семь ТУК-11 и 14 чехлов 12) и отлаженная технология обращения с ними на ФГУП «ПО «Маяк».

Однако следует подчеркнуть, что вне зависимости от типа контейнера основной проблемой при транспортировании некондиционных ОТВС, содержащих негерметичное неосушенное топливо, длительное время находившееся в воде, является обеспечение взрыво- и пожаробезопасности упаковки. Если проблема осушения герметичного топлива в настоящее время решена, то удаление воды из негерметичных твэлов по-прежнему является сложной технической задачей.

В связи с этим было принято решение о перевозке пучков твэлов некондиционных ОТВС в герметичных тонкостенных ампулах (рис. 1), конструкция которых позволяла бы также осуществлять временное технологическое хранение в бассейне-хранилище ФГУП «ПО «Маяк» и перерабатывать их на радиохимическом заводе вместе с ПТ. К ним также предъявлялись требования по прочности в нормальных и аварийных условиях при транспортировании и обращении на АЭС и ФГУП «ПО «Маяк». Конструкция ампул разработана в соответствии с требованиями российских правил обеспечения безопасности на предприятиях атомной энергетики.

Герметичные ампулы заполнялись воздухом при атмосферном давлении без продувки инертными газами. Расчеты и проведенные в ОАО «ГНЦ НИИАР» эксперименты показали, что при этом в их объеме взрыво- и пожароопасная концентрация водорода не образуется в течение как минимум девяти месяцев, если в ампуле размещен один негерметичный твэл, заполненный водой, и пять месяцев – если два. В объеме ТУК-11 взрыво- и пожароопасная концентрация кислорода и водорода не образуется при любом времени нахождения ОЯТ.

Модернизированный чехол 12, в котором транспортировались ампулы с ПТ, содержал специальные вкладыши, которые обеспечивали дополнительную прочность конструкции упаковки и снижали вероятность повреждения ампул в процессе перевозки. Для обеспечения радиационной безопасности при установке крышки на контейнер на территории АЭС и снятия ее на ФГУП «ПО «Маяк» использовалась внутренняя перегрузочная плита, которая являлась частью упаковки. При разработке упаковки наибольшие проблемы создавало ограниченное пространство внутри контейнера. Поэтому грибок внутренней перегрузочной плиты при установке крышки контейнера утапливался в корпус плиты, а при снятии крышки – выдвигался. Конструкция упаковки ТУК-11Р-2 представлена на рисунке 2.

Результаты расчетов по определению напряженно деформированного состояния и оценке прочности транспортного упаковочного комплекта ТУК-11Р-2, загруженного 16 ампулами с ПТ некондиционных ОТВС РБМК-1000, при воздействии механических нагрузок, моделирующих нормальные и аварийные условия перевозки, показали, что упаковка удовлетворяет всем требованиям российских (и, следовательно, международных) правил безопасных перевозок.

РАЗДЕЛКА ОТВС И ЗАГРУЗКА АМПУЛ В ТУК-11Р-2 НА АЭС

Разделка ОТВС на пучки твэлов производилась с помощью фрезерного станка в защитной камере второго энергоблока Ленинградской АЭС. Там же осуществлялась загрузка

their temporary storage in a cooling pool at Mayak and reprocessing at the radiochemical facility together with the fuel bundles. They are also expected to be structurally strong in normal and accidental conditions during transport and handling both at the NPP site and at Mayak. The ampoules were designed in accordance with the requirements of Russian safety regulations applicable to the nuclear industry.

The sealed ampoules were filled with air at atmospheric pressure without inert gas blow down. Calculations and experiments conducted by the Dmitrovgrad's Research Institute of Nuclear Reactors (NIAR) had demonstrated that hydrogen concentrations inside the ampoule cavity would remain below explosion and fire hazard thresholds during at least nine months if the ampoule accommodates one water-logged leaky fuel rod, and five months with two water-logged fuel rods. Inside the TUK-11 cavity, no explosive or flammable concentration of oxygen and hydrogen would ever be reached.

The upgraded basket "12", which was used for transport of ampoules containing the fuel bundles, featured special inserts to provide additional strength to the structure of the package and reduce the probability of damage to the ampoules during transport. In order to ensure radiation safety during the installation of the cask lid on the NPP site and its removal at Mayak, an internal transfer plate was used, which was designed as an integral part of the package. During the package design effort, the most difficult problems were associated with the limited space inside the cask. Hence, the grapple of the internal transfer plate would be submerged into the plate during the cask lid installation and extend out during lid removal. The design of the TUK-11R-2 package is shown in figure 2.

The results of calculations to determine the stress and strain state, assess the structural strength of the TUK-11R-2 transport overpack loaded with 16 ampoules containing sub-standard spent RBMK-1000 fuel bundles when subjected to mechanical loads corresponding to normal and accidental conditions of transport, have demonstrated that the package meets all requirements of the Russian (and consequently, international) safe transport codes.

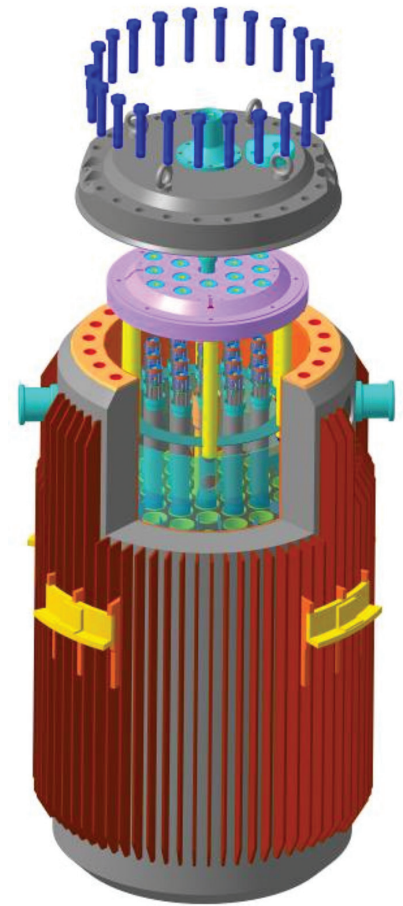


Рис. 2. Упаковка ТУК-11Р-2 для перевозки негерметичных ОТВС реактора РБМК
Fig. 2. TUK-11R-2 package used for transport of leaky RBMK SFAs

ПТ в ампулы и их герметизация специальной крышкой. Для обеспечения радиационной безопасности в процессе перемещения и загрузки ампулы с ПТ в контейнер на ее крышку устанавливались защитная пробка и грибок, верхняя часть которого совместима с захватными механизмами, используемыми в реакторном зале энергоблока.

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

- перецепочный узел для стыковки ТрУ с пробкой защитной камеры и выгрузки ампулы с ПТ из защитной камеры в ТрУ;

- переходный узел и наружная перегрузочная плита для стыковки ТрУ с ТУК-11Р-2 и перегрузки ампулы с ПТ из ТрУ в контейнер.

Данные компоненты упаковки и вспомогательное оборудование удовлетворяли требованиям российских правил обеспечения безопасности на предприятиях атомной энергетики.

ОБРАЩЕНИЕ С АМПУЛАМИ С ПТ НА ФГУП «ПО «МАЯК»

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

Поскольку ампулы были герметичными, утечка продуктов деления из негерметичных твэлов в воду бассейна-хранилища исключалась. Ампулы могли быть и негерметичными, так как суммарные темпы выхода данных продуктов из всех дефектных твэлов в наихудшем случае потребовали бы задействовать не более 25% производительности системы очистки воды бассейна-хранилища. Но поскольку правила перевозки для нормальных условий и аварийных ситуаций однозначно требуют наличия в процессе транспортирования двух барьеров безопасности, выбрали ампулы герметичной конструкции.

Для передачи чехла с ампулами в защитную камеру и извлечения ампул из чехла были разработаны специальные инструменты (переходники, захваты и т.д.), адаптированные к штатному оборудованию защитной камеры. После выполнения указанных операций ампула с ПТ помещалась на ложемент агрегата резки, который разделявал ампулы на фрагменты, пригодные для дальнейшей переработки ОЯТ по технологии, аналогичной технологии переработки ОЯТ реакторов ВВЭР.

* * *

Реализация «пилотного» проекта показала техническую осуществимость разделки негерметичных ОТВС РБМК в защитных сооружениях Ленинградской АЭС, вывоза их в модернизированных ТУК-11Р-2 и переработки по существующей технологической схеме ФГУП «ПО «Маяк» с получением конечного товарного продукта требуемого качества.

SFA CUTTING AND AMPOULE LOADING INTO THE TUK-11R-2 ON NPP SITE

The SFAs were cut into the individual bundles of fuel rods using a milling machine inside a shielded hot cell on Unit 2 at the Leningrad site. The same location was used to load the fuel bundles into the ampoules and seal the ampoules using a special lid. In order to ensure radiation safety during the process of moving and loading the ampoules containing the fuel bundles into the cask, the ampoule lid was fitted with a shielding plug and grapple, the top of which is compatible with the grippers used in the reactor room on Unit 2.

Of all the potential methods for loading the spent fuel into the TUK-11, the chosen process was featured a transfer cask. The cask used was the transfer device (TD) utilised to move SFAs around the reactor room. As part of preparations for ampoules containing the fuel bundles loading into the TUK-11, the following ancillaries were designed:

- a docking unit to connect the TD to the hot cell plug and transfer the ampoules containing the fuel bundles from the cell to the TD;

- a transfer unit and external transfer plate to dock the TD to the TUK-11R-2 and transfer the ampoules containing the fuel bundles from the TD to the cask.

These package components and auxiliaries meet the requirements of Russian safety regulations applicable to nuclear energy sites.

AMPOULE HANDLING AT MAYAK

The TUK-11R-2 cask was received at Mayak using the standard process. The TK-11 container-car was delivered by rail to the spent fuel receiving building where it connected to power supply systems. After opening of the TK-11 top leafs and removal of the cask lid, the internal transfer plate was retrieved, and the basket with ampoules was moved to the storage pool.

With the ampoules being sealed, any potential leakage of fission products from the non-tight fuel rods into the pool water was precluded. Ampoules could have even been non-leaktight, as coping with the total rate of fission products leakage from all failed fuel rods under the worst of circumstances would only involve not more than 25% of the production capacity of the pool water treatment plant. But as the transport regulations unequivocally demand that two containment barriers be provided in both normal and accidental conditions, sealed ampoules were designed for this process.

In order to transfer the basket with ampoules to the hot cell and retrieve the ampoules from the basket, special tooling (adapters, grippers, etc.) was also designed compatible with the main hot cell equipment. After the completion of these operations, the ampoules containing the fuel bundles were placed upon the cradle of the cutting machine, which would then separate the ampoules into fragments suitable for further reprocessing using a process similar to that used for VVER spent fuel.

* * *

The implementation of the "pilot" project has demonstrated that it is technically feasible for leaking spent RBMK fuel assemblies to be cut into bundles at the Leningrad NPP hot cells, transported inside the upgraded TUK-11R-2 cask and reprocessed using the existing Mayak technology to resulting end product of desired quality level.