

И. Р. Шегельман, А. В. Романов, А. С. Васильев, П. О. Щукин

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования «Петрозаводский государственный университет»,  
ОАО «Петрозаводскмаш», Петрозаводск, Россия*

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ И ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Рассмотрены особенности разработки транспортно-упаковочного комплекта повышенной вместимости, обеспечивающего транспортировку и хранение отработавших тепловыделяющих сборок водо-водяных энергетических реакторов типа ВВЭР-1000. Приведены аналоги и достигнутые преимущества конструкции ТУК-146.

*Ключевые слова:* ВВЭР-1000, ТУК-146, транспортно-упаковочный комплект, отработавшее ядерное топливо, перевозка и хранение.

В Российской Федерации и за рубежом накоплено значительное количество отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). В связи с этим назрела необходимость ускоренного решения проблемы качественного и безопасного хранения и транспортировки ОЯТ. При этом следует отметить, что используемый в Российской Федерации парк транспортно-упаковочных комплектов (ТУК) для перевозки и хранения ОЯТ, спроектированных еще в 60 - 70-е годы XX в., не в полной мере соответствует современным требованиям безопасности МАГАТЭ.

С 2010 г. специалисты предприятия ОАО «Петрозаводскмаш», входящего в состав государственной корпорации по атомной энергии «Росатом», и Петрозаводский государственный университет (ПетрГУ) ведут совместную работу по созданию нового современного производства ТУК для ОЯТ повышенной вместимости, удовлетворяющего всем современным требованиям безопасности, предъявляемым к конструкции упаковки для перевозки и хранения ОЯТ типа В(U) – нормативными документами (ПБЯ-06-00-96, НП-053-04, НРБ-99/2009, ГОСТ 25461-82, ГОСТ 26013-83, ГОСТ Р51964-2002, ГОСТ Р15.201-2000, ОСПОРБ-99/2010 и др.), действующими на территории Российской Федерации, и правилами МАГАТЭ TS-R-1.

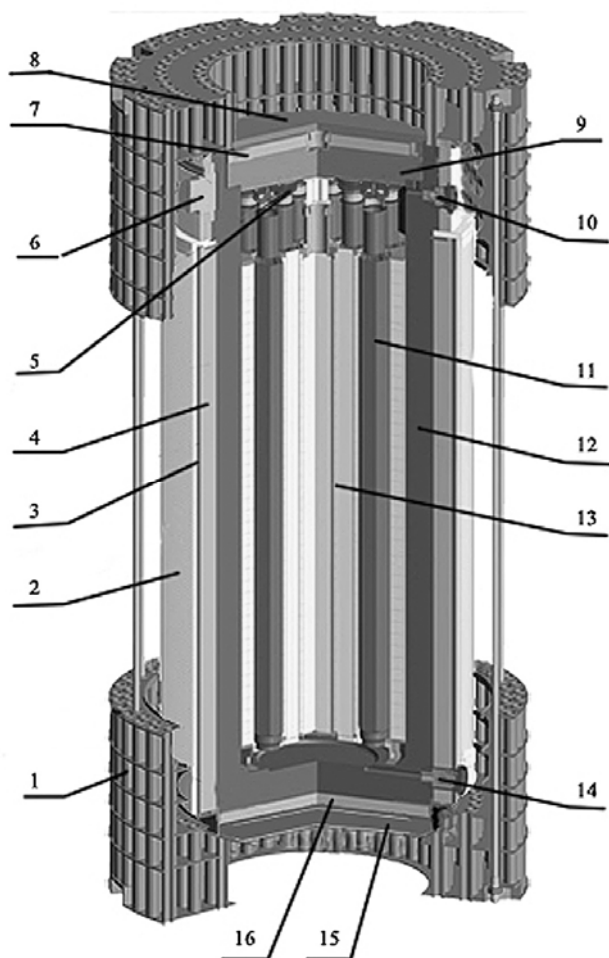
Целью совместного проекта является разработка современной конструкции ТУК типа В(U) повышенной вместимости (до 18 тепловыделяющих сборок) для транспортировки и хранения отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) водо-водяных энергетических реакторов типа ВВЭР-1000 и создание на базе российского промышленного предприятия ОАО «Петрозаводскмаш» нового современного ресурсосберегающего производства по изготовлению данного вида ТУК.

Разрабатываемый ТУК-146 (индекс ТУК присвоен ВНИПИЭТ) предназначен для безопасного транспортирования ОТВС реактора ВВЭР-1000 с территорий атомных электростанций по железнодорожным путям и автомобильным дорогам общего пользования в горизонтальном положении на специальных транспортных средствах, а также хранения ОТВС в вертикальном положении в специализированном хранилище.

ТУК-146 (рисунок) (конструкция ОАО «Конструкторское бюро специального машиностроения») – это сложное наукоемкое устройство, обладающее радиационно-защитными свойствами, высокой прочностью, отвечающее современным экологическим и санитарным требованиям, обеспечивающее безопасную эксплуатацию, в том числе и при аварийных ситуациях, возможных в процессе транспортировки и/или хранения ОЯТ.

С целью принятия эффективных с конструкторской, технологической, экологической и экономической точек зрения решений в отношении организации ресурсосберегающего производства экологически безопасного ТУК для перевозки и хранения ОЯТ была проведена серия научно-исследовательских работ. В их числе осуществлен патентный поиск [1, 2] по существующим отечественным и зарубежным конструкциям и их составным частям, в частности материалам и способам обеспечения радиационной защиты, устройствам для отвода тепла, способам обеспечения герметичности соединений, устройствам для амортизации механических ударов и по другим элементам конструкции ТУК.

В качестве материалов для изготовления корпусов контейнеров типа В (U) для транспортировки ОТВС от реакторов типа ВВЭР-1000 используются нержавеющие стали, металлобетон и высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ВЧШГ).



Структурная схема ТУК-146:

1 - устройство для амортизации ударов; 2 - наружная оболочка; 3 - теплопроводный слой; 4 - боковая нейтронная защита; 5 - пружинная опора; 6 - цапфа; 7 - торцевая нейтронная защита; 8 - крышка наружная; 9 - крышка внутренняя; 10 - верхний клапан; 11 - ОТВС; 12 - корпус контейнера; 13 - дистанционирующая решетка; 14 - нижний клапан; 15 - демпфирующая опора; 16 - нейтронная защита нижней части.

Следует отметить, что использование нержавеющей сталей ведет к значительному удорожанию корпуса контейнера, что обусловлено высокой стоимостью технологии изготовления. Использование металлобетона ведет к увеличению трудоемкости работ, что приводит как к удорожанию изготовления корпуса, так и накладывает ограничения на его вместительность в связи с низкой теплопроводностью бетона. Поскольку контейнеры имеют ограниченный срок службы, то при оценке их эксплуатационных показателей следует учитывать и затраты на их утилизацию. С этой точки зрения металлобетонные контейнеры проигрывают контейнерам с металлическим корпусом.

Анализ научно-технической информации и опыт ОАО «Петрозаводскмаш» позволил сделать вывод о целесообразности изготовления корпуса

контейнера из ВЧШГ, что подтверждается и длительным опытом эксплуатации выпускаемых компанией Scoda JS контейнеров «Castor» с корпусом из ВЧШГ.

Преимущества использования ВЧШГ заключаются в следующем:

создаются условия для надежного неразрушающего ультразвукового контроля корпуса из ВЧШГ по всей его толщине;

контейнеры с корпусом из ВЧШГ позволяют транспортировать и хранить большое число ОТВС с высоким остаточным тепловыделением;

масса корпуса, изготавливаемого путем заливки в металлический кокиль, меньше массы отливок, необходимых для изготовления кованных стальных корпусов, соответственно меньше припуски на толщину стенок корпуса и его днища. При этом сокращается объем и продолжительность механической обработки;

при изготовлении литого корпуса контейнера исключается необходимость трудоемкой сварки корпуса из отдельных обечаек и приварки днища, а также операции по контролю состояния сварных швов;

ВЧШГ обеспечивает хорошую защиту от радиоактивного излучения;

использование ВЧШГ для изготовления корпусов контейнеров позволяет выполнить современные требования, предъявляемые к ТУК для ОЯТ в течение заданного срока службы, в отношении их радиационной безопасности и прочности.

ВЧШГ обладает комплексом ценных физико-химических свойств, которые в сочетании с его высокими прочностными характеристиками ( $R_m$  от 400 до 1600 МПа) и, особенно, повышенной пластичностью ( $A_5$  до 25 %) делают незаменимым его применение для производства изделий самого ответственного назначения: корпусов контейнеров для перевозки и хранения ОЯТ массой свыше 100 т, станин мощных прессов массой до 200 т, деталей газовых и паровых турбин, корпусов насосов различного назначения и компрессоров. Скорость питтинговой коррозии ВЧШГ в морской воде на порядок ниже, чем у стали ( $V_{ВЧШГ} = 0,03$  мм/год,  $V_{ст.20} = 0,5$  мм/год) [5].

Исходя из современного уровня развития производства ТУК, требований экономичности, надежности и безопасности их эксплуатации, были сформулированы следующие основные положения для разработки конструкции ТУК для транспортировки ОЯТ реакторов типа ВВЭР-1000 [3]:

необходимость учета требований, предъявляемых Правилами МАГАТЭ TS-R-1 и нормативными документами, действующими на территории Российской Федерации к конструкции

упаковки типа В(U);

возможность использования контейнера как для транспортировки, так и для временного хранения ОТВС;

возможность перевозки транспортно-упаковочных комплексов различными видами транспорта: автомобильным, морским, речным, по железной дороге в существующих железнодорожных габаритах, а также обращения с ним, включая загрузку и выгрузку ТВС с ОЯТ, на всех объектах предполагаемой эксплуатации транспортно-упаковочного комплекта с учетом действующих на них транспортно-технологических схем обращения с контейнерами;

наличие не менее двух барьеров герметичности;

использование надежной нейтронной защиты;

наличие устройства, обеспечивающего удаление воды из контейнера, осушку его внутренней полости с последующим заполнением ее инертным газом;

вместимость не менее 18 ОТВС с максимальной глубиной выгорания до 70 ГВт-сут/т урана и мощностью остаточного тепловыделения до 35 кВт;

максимальную температуру оболочек ОТВС не более 350 °С;

массу не более 150 т, наружный диаметр не более 3250 мм и длину не более 6850 мм;

назначенный срок службы не менее 50 лет;

применение материалов в конструкции транспортно-упаковочных комплексов, которые уже освоены промышленностью и используются в атомном машиностроении.

С учетом этого разработана конструкция ТУК-146, включающая контейнер, на торцевых поверхностях которого размещаются устройства для амортизации механических ударов. Контейнер предназначен для загрузки ОЯТ и размещения его на площадке временного хранения. Внутри контейнера размещаются ТВС с ОЯТ, фиксируемые в определенном относительно корпуса и друг друга положении с помощью специального устройства – корзины. Достоинство ТУК-146 – его увеличенная вместимость до 18 ТВС. Поэтому при разработке ТУК-146 обеспечены повышенные требования к его конструкции, направленные на надежную защиту окружающей среды от радиоактивного (гамма- и нейтронного) излучения, и на эффективный отвод тепла от его внутренней полости, исключаящий нагрев ТВС сверх допустимой температуры.

Поскольку ТУК-146 рассчитан на повышенное количество ТВС, то контейнер, входящий в его состав, имеет внушительную толщину стенки. Таким образом, возникла необходимость по-

иска новых технических решений по изготовлению корпусной толстостенной отливки. В связи с этим специалистами ОАО «Петрозаводскмаш» и НПО «ЦНИИТМАШ» был разработан уникальный технологический процесс изготовления корпусных толстостенных отливок (содержащий ноу-хау), позволяющий получать толстостенные крупнотоннажные изделия с более высокой (примерно на 20 %) изотропностью физико-механических свойств.

При проектировании конструкции контейнера было найдено новое техническое решение в отношении исполнения нейтронной защиты, которое защищено патентом [4]. Предложенная конструкция нейтронной защиты контейнера обеспечивает высокие радиационно-защитные свойства, хороший отвод тепла от внутренней оболочки контейнера к его внешней оболочке, а также обладает высокой технологичностью за счет простоты изготовления и сборки.

Как отмечалось выше, ТУК состоит из контейнера, на наружной поверхности которого монтируются специальные устройства для амортизации механических ударов, назначение которых – снижение вредных последствий воздействия внешней силы в результате неаккуратного обращения с контейнером или возникновения аварийной ситуации, например возможного падения контейнера с транспортного средства во время транспортировки, и защита его содержимого от разрушения и потери герметичности.

На основе исследований [2, 5, 6 и др.], выполненных специалистами ПетрГУ совместно со специалистами ОАО «Петрозаводскмаш», были предложены варианты технических решений в отношении конструкции устройств для амортизации механических ударов и устройства нейтронной защиты ТУК для перевозки и хранения ОЯТ, на которые федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам (РОСПАТЕНТ) выдано пять патентов на полезную модель [4, 7 - 10]. Особенности предложенных конструкций демпфирующих устройств контейнеров является использование в качестве демпфирующего наполнителя модифицированной древесины, а также сочетания древесных и металлических демпфирующих элементов, которое позволяет за счет возникновения синергетического эффекта значительно улучшить характеристики демпфирующего устройства.

Наиболее близкими аналогами ТУК-146 являются [3]:

немецкие контейнеры «CASTOR» с корпусами из ВЧШГ (разработка «GNB»);

шведские ТУК «PWR» фирмы «Karnbranslehantering AB»;

французские ТУК типа «TN» фирмы «Transnucleaire» для различных видов топлива, вывозимого во Францию на переработку, и используемые в странах Европы для контейнерного хранения;

российский аналог ТУК-13 и его модификации.

Предполагаемая конструкция ТУК-146 обладает следующими достоинствами:

увеличенная вместимость, что позволит сократить число рейсов при перевозках ОЯТ от атомных электростанций к месту хранения и уменьшить необходимое число контейнеров при организации контейнерного хранения ОЯТ;

два барьера герметичности, что отвечает современным требованиям по безопасности;

твердая нейтронная защита (ТУК-106 и ТУК-11 разрабатывались для использования в водозаполненном варианте и не имеют нейтронной защиты), а ТУК-10 и ТУК-13 имеют жидкую нейтронную защиту, которая легко может быть утрачена в аварийных ситуациях, связанных с падением контейнера или его попаданием в очаг пожара [3]. ТУК-146 с твердой нейтронной защитой будет лишен этих недостатков;

эффективная система демпфирования. Демпфирование ударных нагрузок ТУК-106 и ТУК-11 осуществляется стальными продольными ребрами, приваренными к наружной цилиндрической поверхности их корпусов и радиальными ребрами, приваренными к наружной поверхности их крышек. Демпфирующие элементы на днищах указанных контейнеров отсутствуют. Демпфиро-

вание ударных нагрузок ТУК-10 и ТУК-13 при горизонтальных падениях и падениях на днище осуществляется шпангоутами и ребрами, установленными в полостях нейтронной защиты, а при падении на крышки – стальными приварными радиальными ребрами. Металлобетонные контейнеры ТУК-104 и ТУК-109 устанавливаются при транспортировании в сложный защитно-демпфирующий кожух, изготавливаемый из сминаемых стальных элементов (диафрагмы, ребра, трубы) [3]. ТУК-146 будет снабжен торцевыми демпферами, обеспечивающими хорошие демпфирующие свойства при падении контейнера под любым углом к горизонту;

современный корпус из ВЧШГ, преимущества которого по сравнению со стальными корпусами ТУК-6, ТУК-10, ТУК-11 и ТУК-13 описаны выше;

габариты ТУК-146 позволят использовать его в ядерном топливном цикле на имеющемся инфраструктурном оборудовании;

стоимость ТУК-146 меньше, чем у аналогов при соответствии всем современным требованиям, предъявляемым к конструкции упаковки типа В(U), в том числе и Правилам МАГАТЭ TS-R-1.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по договору № 13.G25.31.0066 по реализации комплексного проекта «Создание ресурсосберегающего производства экологически безопасного транспортно-упаковочного комплекта для перевозки и хранения отработавшего ядерного топлива».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев А.С., Еришов А.В. Особенности патентного поиска в области создания транспортно-упаковочного комплекта для отработавшего ядерного топлива // Ученые записки Петрозавод. гос. ун-та: науч. журн. - 2011. - № 6(119). - С. 78 - 80.
2. Васильев А.С., Щукин П.О. Некоторые аспекты выбора конструкции транспортно-упаковочного комплекта для перевозки и хранения отработавшего ядерного топлива // Глобальный научный потенциал. - 2011. - Вып. 8. - С. 116 - 118.
3. Пояснительная записка к техническому предложению «Транспортно-упаковочный комплект для перевозки и хранения отработавшего ядерного топлива» / Петрозаводский государственный университет; рук. И. Р. Шегельман, А. В. Романов. - Петрозаводск, 2010. - 25 с.
4. Пат. 115119 Российская федерация, МПК<sup>7</sup> G 21 F 5/00. Устройство для хранения и транспортировки отработавшего ядерного топлива / И. Р. Шегельман, А. В. Романов, В. Д. Гуськов, А. С. Васильев; Заявитель и патентобладатель Петрозавод. гос. ун-т. - № 2011145824/07; Заявл. 10.11.2011; Опубл. 20.04.2012. Бюл. № 11. - 10 с.
5. Васильев А.С., Романов А.В., Шегельман И.Р. К выбору конструкции амортизатора транспортно-упаковочного комплекта для хранения и транспортировки отработавшего ядерного топлива // Глобальный научный потенциал. - 2011. - Вып. 9. - С. 56 - 58.
6. Васильев А.С., Шегельман И.Р., Романов А.В. Создание ресурсосберегающего производства экологически безопасного транспортно-упаковочного комплекта для перевозки и хранения отработавшего ядерного топлива // Наука и бизнес: пути развития. - М., 2012. - Вып. 1(07). - С. 58 - 61.
7. Пат. 114739 Российская федерация, МПК<sup>7</sup> F 16 F 7/00, G 21 F 5/00, B 65 D 81/02. Демпферное устройство контейнера для транспортировки и хранения отработавшего ядерного топлива / А. С. Васильев, А. В. Романов, И. Р. Шегельман, В. Д. Гуськов; Заявитель и патентобладатель Петрозавод. гос. ун-т. - № 2011140208/11; Заявл. 03.10.2011; Опубл. 10.04.2012. Бюл. № 10. - 9 с.
8. Пат. 118464 Российская федерация, МПК<sup>7</sup> G 21 F 5/00. Устройство для хранения и транспортировки отработавшего ядерного топлива / И. Р. Шегель-

- ман, А. В. Романов, А. С. Васильев; Заявитель и патентобладатель Петрозавод. гос. ун-т. - № 2011144536/07; Заявл. 02.11.2011; Опубл. 20.07.2012. Бюл. № 20. - 8 с.
9. Пат. 118620 Российская федерация, МПК<sup>7</sup> G 21 F 5/00. Демпфер контейнера для транспортировки и хранения отработавшего ядерного топлива / А. С. Васильев, А. В. Романов, И. Р. Шегельман, В. Д. Гуськов; Заявитель и патентобладатель Петрозавод. гос. ун-т. - № 2011140207/12; Заявл. 03.10.2011; Опубл. 27.07.2012. Бюл. № 21. - 9 с.
10. Пат. 118620 Российская федерация, МПК<sup>7</sup> G 21 F 5/00. Защитно-демпфирующее устройство контейнера / И. Р. Шегельман, А. С. Васильев, А. В. Романов; Заявитель и патентобладатель Петрозавод. гос. ун-т. - № 2012110859/12; Заявл. 21.03.2012; Опубл. 27.07.2012. Бюл. № 21. - 8 с.

**І. Р. Шегельман, О. В. Романов, О. С. Васильєв, П. О. Щукін**

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ СТВОРЕННЯ ОБЛАДНАННЯ  
ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ ТА ЗБЕРІГАННЯ ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА**

Розглянуто особливості розробки транспортно-пакувального комплексу підвищеної місткості, що забезпечує транспортування та зберігання відпрацьованих тепловиділяючих збірок водо-водяних енергетичних реакторів типу ВВЕР-1000. Наведено аналоги й досягнуті переваги конструкції ТУК-146.

*Ключові слова:* ВВЕР-1000, ТУК-146, транспортно-пакувальний комплект, відпрацьоване ядерне паливо, перевезення та зберігання.

**I. R. Shegelman, A. V. Romanov, A. S. Vasiliev, P. O. Shchukin**

**SCIENTIFIC AND TECHNICAL ASPECTS OF CREATING  
SPENT NUCLEAR FUEL SHIPPING AND STORAGE EQUIPMENT**

Details of advanced capacity shipping packaging set development which allows shipping and storage of heat-producing spent fuel assemblies for pressurized water reactor VVER-1000 type are considered. Analogues and achieved advantages of TUK-146 construction are mentioned.

*Keywords:* shipping packaging set, spent nuclear fuel, transportation and storage, TUK-146, VVER-1000.

Надійшла 27.11.2012

Received 27.11.2012