

## Модернизация корпуса контейнера для транспортировки и хранения отработавшего ядерного топлива

*И.Р. Шегельман, А.С. Васильев*

*Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск*

**Аннотация:** Проведен системный анализ конструкций контейнеров для транспортировки и хранения отработавшего ядерного топлива. Выявлена тенденция к их совершенствованию с использованием инновационного потенциала современных достижений науки и техники. На основе результатов системного анализа предложена модернизированная литая конструкция контейнера. В стенку корпуса влит нейтронно-защитный барьер из материала с температурой плавления выше температуры плавления материала корпуса и коэффициентом теплопроводности не меньшим, чем у материала литого корпуса. Барьер препятствует свободному пролету нейтронов в радиальных направлениях.

**Ключевые слова:** атомная энергетика, контейнер, отработавшее ядерное топливо, транспортировка и хранение.

Одной из составляющих поиска новых технических решений является всестороннее изучение рассматриваемого объекта техники – проведение системного анализа. Системный анализ позволяет выделить выраженную тенденцию к использованию инновационного потенциала современных достижений науки и техники к совершенствованию технологий в различных отраслях промышленности [1, 2]. Это положение в полной мере относится к атомной энергетике в целом и в частности к способам обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) атомных электростанций [3–5].

Контейнеры для транспортировки и хранения ОЯТ, изготавливаемые из высокопрочного чугуна, имеют, как правило, цилиндрическую форму. Их внешний диаметр и высота могут достигать до нескольких метров, толщина стенок контейнера, может достигать нескольких десятков сантиметров. Эти особенности требуют повышения технологичности контейнеров для снижения трудоемкости работ при их изготовлении и сборке.

При анализе выявлены недостатки известных конструкций контейнеров. Например, недостатком контейнера [6] является сложность изготовления и монтажа дополнительного промежуточного слоя из секций со сквозными

---

отверстиями, заполняемыми материалом нейтронной защиты. Недостатком контейнера [7] является сложность монтажа элементов с высокой теплопроводностью, проходящих через материал для поглощения нейтронов при сборке контейнера. Недостатком контейнера [8] является высокая трудоемкость заполнения полости между обечайками и арматурой тяжелым бетоном, недостаточная теплопроводность бетона. Контейнер ТУК 141 [9, 10] для топлива с повышенным выгоранием сложен в изготовлении, отверстия для нейтронной защиты выполняются продольным глубоким сверлением корпуса со стороны дна в шахматном порядке и требуют высокой точности изготовления, а повышение активности топлива приводит к необходимости увеличения диаметра отверстий и соответственно толщины стенки корпуса.

При участии авторов предложена модернизированная конструкция контейнера, корпус которого выполняют литым с внутренним объемом под чехол из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. В стенку корпуса влит нейтронно-защитный барьер из материала с температурой плавления выше температуры плавления материала литого корпуса. Этот барьер выполняют из чередующихся вставок, образующих сплошную стенку, препятствующую свободному пролету нейтронов в радиальных направлениях.

Благодаря тому, что нейтронно-защитный барьер установлен не по всей длине литого корпуса, обеспечивается целостность и прочность корпуса. Наличие перемычек металла между вставками на уровне донной части отливки корпуса обеспечивает прочность корпуса контейнера в его донной части. В качестве нейтронно-защитного материала может быть использован графит – материал который нашел широкое применение в реакторах на тепловых нейтронах в качестве замедлителя нейтронов. Боросодержащий

---



(борный) графит, графит с добавлением гадолиния, графит с добавками бора и гадолиния в общем объеме 0–10%.

В настоящее время преимущественное применение в качестве нейтронной защиты в корпусах контейнеров транспортно-упаковочных комплектов нашли твердые водородосодержащие материалы такие как полиэтилен, полипропилен.

Сравнительный анализ нейтронной защиты из полиэтилена и графита показывает, что чистый графит в 1,7 раза хуже замедляет нейтроны по сравнению с полиэтиленом, но с учетом добавок к графиту в виде бора и гадолиния его нейтронно-защитные способности будут возрастать, уменьшая разницу в эффективности по сравнению с полиэтиленом. К достоинствам графита относятся высокая прочность, хорошая податливость механической обработке, высокая теплопроводность и незначительное тепловое расширение. Его коэффициент теплопроводности существенно выше, чем у чугуна с шаровидным графитом из которого изготовлен корпус. Графит является хорошим проводником тепла, благодаря чему будет обеспечен хороший отвод тепла от внутренней поверхности корпуса к его наружной поверхности. Борированный графит имеет более совершенную структуру, повышенную прочность, лучшую способность поглощать нейтроны. Борный графит готовят из смеси графита и какого-либо соединения бора (B<sub>4</sub>C, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и др.). Лист из борного графита толщиной 2,5 см (с массовым содержанием бора до 4%) ослабляет плотность потока тепловых нейтронов в 400 раз [11]. В атомной технике гадолиний нашел применение для защиты от нейтронов, он обладает наивысшей способностью к захвату нейтронов из всех стабильных изотопов. Его сечение равно 46 000 барн. Из всех изотопов гадолиния наивысшей способностью к захвату нейтронов обладает его изотоп гадолиний-157 [12].

---

В корпус модернизированного контейнера устанавливают чехол. Чехол может быть установлен по посадке с натягом; соединен за счет усадки металла при остывании отливки корпуса контейнера, для чего чехол устанавливают в литейную форму в качестве стержня при изготовлении отливки корпуса контейнера. На дно контейнера устанавливают крышку, под которую предварительно помещают нейтронно-защитный материал. В каналах чехла устанавливают тепловыделяющие сборки, контейнер закрывают крышками, образующими два барьера герметичности, между крышками и размещают нейтронно-защитный материал.

Во время эксплуатации контейнера для транспортировки и хранения отработавшего ядерного топлива тепло излучаемое тепловыделяющими сборками передается к внутренней поверхности контейнера под чехол и через нейтронно-защитный барьер к наружной поверхности корпуса и далее отводится в окружающую среду. При этом нейтронное излучение, испускаемое тепловыделяющими сборками будет задерживаться нейтронно-защитным барьером, состоящим из вставок, образующих сплошную стенку, препятствующую свободному пролету нейтронов в радиальных направлениях.

Реализован корпус контейнера для транспортировки и хранения отработавшего ядерного топлива может быть следующим образом. Собирают литейную форму. Для этого устанавливают поддон. На поддон устанавливают стержень формирующий внутренний объем под чехол отливки корпуса. На поддон устанавливают нижний и верхний кокиль. На верхний кокиль сверху устанавливают крышку формы.

В литейную форму в качестве стержней устанавливают вставки из нейтронно-защитного материала, таким образом, чтобы сформировать сплошную стенку. Одним концом вставки выходят за пределы отливки корпуса и проходят через отверстия в крышке. Сверху на крышку

---

устанавливают груз, предотвращающий всплытие вставок вследствие действия выталкивающей силы при заполнении литейной формы расплавом металла. Литейную форму заполняют расплавом высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. По мере остывания расплава металла нейтронно-защитный барьер, образуемый вставками, оказывается влитым в отливку корпуса.

Благодаря тому, что материал нейтронно-защитного барьера образует сплошную стенку на уровне, соответствующем внутреннему объему под чехол, в верхней и донной частях отливки обеспечивается ее целостность и прочность. Через донную часть проходят лишь утонченные части вставок, что обеспечивает наличие перемычек металла между ними и тем самым прочность отливки в ее донной части.

Температура плавления материала, из которого выполнен нейтронно-защитный барьер выше температуры плавления материала корпуса гарантирует то, что при изготовлении отливки корпуса контейнера для транспортировки и хранения отработавшего ядерного топлива не произойдет расплавление материала, из которого изготовлен нейтронно-защитный барьер.

Благодаря тому, что в отливке корпуса контейнера установлен нейтронно-защитный барьер из материала с коэффициентом теплопроводности большим, чем у материала корпуса обеспечивается улучшенный отвод тепла от внутренней посадочной поверхности под чехол к его наружной поверхности, что ведет к снижению риска возникновения неконтролируемых ядерных реакций в результате перегрева тепловыделяющих сборок, загруженных в чехол контейнера.

Благодаря выполнению нейтронно-защитного барьера из материала с температурой плавления выше температуры плавления материала корпуса обеспечивается возможность заливки этого барьера расплавом металла при

---

изготовлении отливки корпуса контейнера и размещение его в стенке отливаемого корпуса на этапе изготовления отливки.

Использование метода системного анализа позволило разложить рассматриваемый объект на составные элементы, проанализировать особенности технологического процесса его изготовления и найти потенциал совершенствования конструкции контейнера для перевозки и хранения отработавшего ядерного топлива и предложить инновационное решение для реализации этого потенциала.

### Литература

1. Кудрявцев П.Г., Фиговский О.Л. Нанокompозитные органоминеральные гибридные материалы // Инженерный вестник Дона. 2014. № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476).
2. Фиговский О.Л., Кудрявцев Н.П., Ольховик Е.О. Устройство для измерения магнитных характеристик ферромагнитных материалов при объемном напряженном состоянии // Инженерный вестник Дона. 2016. № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3740](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3740).
3. Report urges fuller embrace of nuclear energy // CBS Interactive Inc. 2011. URL: [cbsnews.com/news/report-urges-fuller-embrace-of-nuclear-energy/](http://cbsnews.com/news/report-urges-fuller-embrace-of-nuclear-energy/) (date of access: 26.08.2018).
4. Safer storage of spent nuclear fuel // Union of concerned scientists. Science for a healthy planet and safer world. URL: [ucsusa.org/nuclear-power/nuclear-waste/safer-storage-of-spent-fuel#.W4wk\\_399iM8](http://ucsusa.org/nuclear-power/nuclear-waste/safer-storage-of-spent-fuel#.W4wk_399iM8) (date of access: 26.08.2018).
5. An American Nuclear society // Center for Nuclear Science and technology information. URL: [nuclearconnect.org/know-nuclear/technology/nuclear-waste](http://nuclearconnect.org/know-nuclear/technology/nuclear-waste) (date of access: 26.08.2018).



6. Контейнер для транспортировки и хранения радиоактивных отходов АЭС. URL: [ru-patent.info/20/50-54/2054205.html](http://ru-patent.info/20/50-54/2054205.html) (дата обращения: 26.08.2018).

7. Контейнер для транспортировки и/или хранения отработавшего ядерного топлива. URL: [fips.ru/Archive/PAT/2009FULL/2009.02.27/DOC/RUNWC1/000/000/002/348/085/DOCUMENT.PDF](http://fips.ru/Archive/PAT/2009FULL/2009.02.27/DOC/RUNWC1/000/000/002/348/085/DOCUMENT.PDF) (дата обращения: 26.08.2018).

8. Контейнер для транспортировки и/или хранения отработавшего ядерного топлива. URL: [ru-patent.info/20/80-84/2084975.html](http://ru-patent.info/20/80-84/2084975.html) (дата обращения: 26.08.2018).

9. Программа развития контейнерных технологий обращения с ОТВС российских АЭС, как инструмент унификации решений по длительному хранению ОЯТ. С. 9. URL: [2015.atomexpo.ru/mediafiles/u/files/materials/6/Afonutin.pdf](http://2015.atomexpo.ru/mediafiles/u/files/materials/6/Afonutin.pdf) (дата обращения: 26.08.2018).

10. Информационный бюллетень. № 4. 2016. URL: [sosny.bas-net.by/wp-content/blogs.dir/2/files/2017/03/bull\\_4\\_2016.pdf](http://sosny.bas-net.by/wp-content/blogs.dir/2/files/2017/03/bull_4_2016.pdf) (дата обращения: 26.08.2018).

11. Защита от ионизирующих излучений. Источники ионизирующих излучений АЭС. URL: [zinref.ru/000\\_uchebniki/05300\\_tehnika\\_bezopasnosti/010\\_00\\_00\\_voprosi\\_dozimetrii\\_nosovski\\_1998/007.htm](http://zinref.ru/000_uchebniki/05300_tehnika_bezopasnosti/010_00_00_voprosi_dozimetrii_nosovski_1998/007.htm) (дата обращения: 26.08.2018).

12. Справочник химика. Химия и химическая технология. Гадолиний. URL: [chem21.info/page/005059191229237063075030088004015245202249173107/](http://chem21.info/page/005059191229237063075030088004015245202249173107/) (дата обращения: 26.08.2018).

### References

1. Kudryavcev P.G., Figovskij O.L. Inženernyj vestnik Dona (Rus). 2014. № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476).



2. Figovskij O.L., Kudryavcev N.P., Ol'hovik E.O. Inženernyj vestnik Dona (Rus). 2016. № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3740](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3740).
  3. Report urges fuller embrace of nuclear energy. CBS Interactive Inc. 2011. URL: [cbsnews.com/news/report-urges-fuller-embrace-of-nuclear-energy/](http://cbsnews.com/news/report-urges-fuller-embrace-of-nuclear-energy/) (accessed 26/08/2018).
  4. Safer storage of spent nuclear fuel. Union of concerned scientists. Science for a healthy planet and safer world. URL: [ucsusa.org/nuclear-power/nuclear-waste/safer-storage-of-spent-fuel#.W4wk\\_399iM8](http://ucsusa.org/nuclear-power/nuclear-waste/safer-storage-of-spent-fuel#.W4wk_399iM8) (accessed 26/08/2018).
  5. An American Nuclear society. Center for Nuclear Science and technology information. URL: [nuclearconnect.org/know-nuclear/technology/nuclear-waste](http://nuclearconnect.org/know-nuclear/technology/nuclear-waste) (accessed 26/08/2018).
  6. Kontejner dlya transportirovki i hraneniya radioaktivnyh othodov AEHS [Container for transportation and storage of radioactive waste of nuclear power plants]. URL: [ru-patent.info/20/50-54/2054205.html](http://ru-patent.info/20/50-54/2054205.html) (accessed 26/08/2018).
  7. Kontejner dlya transportirovki i/ili hraneniya otrabotavshego yadernogo topliva [Container for transportation and / or storage of spent nuclear fuel]. URL: [fips.ru/Archive/PAT/2009FULL/2009.02.27/DOC/RUNWC1/000/000/002/348/085/DOCUMENT.PDF](http://fips.ru/Archive/PAT/2009FULL/2009.02.27/DOC/RUNWC1/000/000/002/348/085/DOCUMENT.PDF) (accessed 26/08/2018).
  8. Kontejner dlya transportirovki i/ili hraneniya otrabotavshego yadernogo topliva [Container for transportation and / or storage of spent nuclear fuel]. URL: [ru-patent.info/20/80-84/2084975.html](http://ru-patent.info/20/80-84/2084975.html) (accessed 26/08/2018).
  9. Programma razvitiya kontejneryh tekhnologij obrashcheniya s OTVS rossijskih AEHS, kak instrument unifikacii reshenij po dlitel'nomu hraneniyu OYAT [The program of development of container technologies for handling SFA of Russian NPPs, as a tool for unifying solutions for long-term storage of SNF].
-





Рр. 9. URL: [2015.atomexpo.ru/mediafiles/u/files/materials/6/Afonutin.pdf](http://2015.atomexpo.ru/mediafiles/u/files/materials/6/Afonutin.pdf) (accessed 26/08/2018).

10. Informacionnyj byulleten' [Information Bulletin]. № 4. 2016. URL: [sosny.bas-net.by/wp-content/blogs.dir/2/files/2017/03/bull\\_4\\_2016.pdf](http://sosny.bas-net.by/wp-content/blogs.dir/2/files/2017/03/bull_4_2016.pdf) (accessed 26/08/2018).

11. Zashchita ot ioniziruyushchih izluchenij. Istochniki ioniziruyushchih izluchenij AEHS [Protection against ionizing radiation. Sources of ionizing radiation from nuclear power plants]. URL: [zinref.ru/000\\_uchebniki/05300\\_tehnika\\_bezopasnosti/010\\_00\\_00\\_voprosi\\_dozimetrii\\_nosovski\\_1998/007.htm](http://zinref.ru/000_uchebniki/05300_tehnika_bezopasnosti/010_00_00_voprosi_dozimetrii_nosovski_1998/007.htm) (accessed 26/08/2018).

12. Spravochnik himika. Himiya i himicheskaya tekhnologiya. Gadolinij [Handbook of the chemist. Chemistry and chemical technology. Gadolinium]. URL: [chem21.info/page/005059191229237063075030088004015245202249173107/](http://chem21.info/page/005059191229237063075030088004015245202249173107/) (accessed 26/08/2018).