

ВОЗМОЖНЫЕ СПОСОБЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ БЕЛОРУССКОЙ АЭС НИЗКОЙ АКТИВНОСТИ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ НА ЗАХОРОНЕНИЕ

А. М. Жемжуров¹⁾, Н. В. Горбачева¹⁾

¹⁾ ГНУ «ОИЭЯИ – Сосны» НАН Беларуси, 223063, д. Прилесье, Луговослободской с/с, 47/22,
Минский р-н, Минская обл., Беларусь., zhemzhurov.a@sosny.bas-net.by

Выполнен анализ способов кондиционирования радиоактивных отходов, образующихся при эксплуатации Белорусской АЭС. Рассмотрены аспекты, обуславливающие необходимость дополнительного кондиционирования радиоактивных отходов низкой активности Белорусской АЭС при передаче на захоронение в планируемый пункт захоронения радиоактивных отходов. Определены возможные варианты контейнеризации отходов низкой активности, обеспечивающие выполнение соответствия критериям приемлемости при размещении в пункт захоронения.

Ключевые слова: атомная электростанция; радиоактивные отходы; захоронение радиоактивных отходов; кондиционирование радиоактивных отходов; критерии приемлемости.

POSSIBLE WAYS OF CONDITIONING OPERATIONAL LOW-LEVEL RADIOACTIVE WASTE FROM BELARUSIAN NPP DURING TRANSFER FOR DISPOSAL

A. M. Zhemzhurov¹⁾, N. V. Gorbacheva¹⁾

¹⁾ State Scientific Institution “Joint Institute for Energy and Nuclear Research – Sosny”
of the National Academy of Sciences of Belarus, 223063, Prilesye village, Lugovoslobodskoy s/s, 47/22,
Minsk district, Minsk region, Belarus, zhemzhurov.a@sosny.bas-net.by

The methods of conditioning radioactive waste generated during the operation of the Belarusian NPP are analyzed. Aspects, causing the necessity of additional conditioning of low activity radioactive waste of the Belarusian NPP when transferring it for disposal to the planned radioactive waste disposal facility, have been considered. Possible options for containerization of low-level waste to ensure compliance with the eligibility criteria for disposal to a disposal facility are identified.

Keywords: nuclear power plant; radioactive waste; disposal of radioactive waste; conditioning of radioactive waste; acceptance criteria.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2025-2-49-54>

Обязательным этапом подготовки радиоактивных отходов (РАО) к окончательной изоляции является их кондиционирование. Кондиционирование твердых РАО (ТРО) обеспечивается их переводом в физическую форму и состояние, пригодные для захоронения и соответствующие критериям приемлемости для захоронения. Кондиционирование включает помещение РАО в специальные контейнеры и при необходимости применение дополнительного контейнера [1]. Для планируемых сооружений захоронения требования к конечным формам упакованных РАО определяются исходя из общих критериев приемлемости для захоронения, регламентированным требованиями [2].

Кондиционирование эксплуатационных РАО на Белорусской АЭС включает операции по изготовлению упаковки приемлемой для манипулирования, хранения и перевозки РАО. Для этих целей предусматривается использование сертифицированных контейнеров типа НЗК (железобетонный невозвратный защитный контейнер) и специальных 200-литровых металлических бочек [3].

В настоящей работе выполнен анализ способов кондиционирования РАО, образующихся при эксплуатации Белорусской АЭС. Рассмотрены аспекты, обуславливающие необходимость дополнительного кондиционирования РАО низкой активности Белорусской АЭС при передаче на захоронение в планируемый пункт захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО). Определены возможные варианты их контейнеризации, обеспечивающие выполнение требований к огнестойкости конечных форм упаковок и соответствие критериям приемлемости при захоронении в планируемый ПЗРО.

Необходимость дополнительного кондиционирования ТРО, поступающих на захоронение с Белорусской АЭС

В научном учреждении «ОИЭЯИ – Сосны», в рамках заданий государственной программы «Наукоемкие технологии и техника» на 2021-2025 годы, проработаны возможные концептуальные решения приповерхностного захоронения РАО категорий очень низкоактивные (ОНРАО), низкоактивные (НАО) и короткоживущие среднеактивные (САО), образующихся при эксплуатации Белорусской АЭС. В [4 – 7] рассмотрены полузаглубленный и наземный варианты такого захоронения. При разработке технической концепции ПЗРО на основе проектных данных по количественным и радиационным характеристикам ТРО, образующихся на АЭС, определялась необходимость их дополнительного кондиционирования для приведения в соответствие общим критериям для захоронения, регламентируемым [2]. Поступающие с АЭС на захоронение ТРО могут быть разделены на две группы [3; 4]:

- первичные упаковки РАО в форме, отвечающей критериям приемлемости для захоронения;
- первичные упаковки РАО, для которых выявлена необходимость дополнительного кондиционирования для приведения их к конечной форме, приемлемой для приповерхностного захоронения.

Ко второй группе относятся:

- упаковки с отходами категории САО в 200-литровых бочках, которые не удовлетворяют критериям приемлемости в части сохранения изолирующей способности упаковки РАО и устойчивости к термическим циклам;
- упаковки с горючими НАО и ОНРАО, сформированные на основе 200-литровых бочек, которые не удовлетворяют критериям приемлемости [2] в части обязательного размещения горючих ТРО в контейнере, соответствующем требованиям к огнестойкости.

В качестве конечной формы упаковки для размещения на захоронение бочек с ТРО категории САО рекомендован контейнер НЗК-150-1,5П, обеспечивающий соответствие нормативным требованиям по критериям приемлемости, в том числе снижение мощности дозы гамма-излучения на его поверхности до регламентируемых уровней [4]. Для размещения на захоронение бочек с горючими ОНРАО и НАО также был рекомендован контейнер НЗК-150-1,5П, обеспечивающий необходимые требования к огнестойкости и унификацию с проектным решением по контейнеризации отвержденных жидких РАО, осушенных ионообменных смол и бочек с ТРО категории САО.

В настоящей работе рассматриваются способы кондиционирования ОНРАО за исключением эксплуатационной категории «очень низкоактивные отходы» введенной на Белорусской АЭС (ОНАО), входящих в их состав. Для ОНАО предусмотрен особый порядок обращения и упаковки на АЭС [8] и при захоронении [4].

Обеспечение безопасности и эффективности при обращении с РАО с использованием НЗК-150-1,5П

Основные технические характеристики сертифицированного НЗК-150-1,5П, выпускаемого АО «345 Механический завод» (Россия), согласно [9]: емкость – 1,5 м³; толщина стенок – 150 мм; габаритные размеры (длина×ширина×высота) – 1650×1650×1375 мм; масса без отходов – 4 т; масса с отходами – не более 7 т.

Согласно пункту 23 [2] в общем случае для захоронения допустимы негорючие и трудногорючие РАО. Горючие РАО могут быть приняты на захоронение, если они упакованы в соответствующем контейнере (упаковочном комплекте), при этом полученная упаковка РАО соответствует требованиям к огнестойкости, установленным в проекте ПЗРО. Контейнер для РАО, представляющий собой железобетонную конструкцию в виде замкнутой со всех сторон емкости, можно рассматривать как отдельное сооружение с ограждающими конструкциями, являющимися противопожарными преградами. В соответствии с российскими СП 486.1311500.2020 к таким преградам относятся ограждающие конструкции с пределом огнестойкости не менее 0,75 ч. Выполненные в соответствии с [10] расчёты показывают, что при толщине стенки 150 мм железобетонная конструкция имеет предел огнестойкости выше 1,5 ч для всех типов армированных бетонов независимо от характера пожарной нагрузки. Исходя из этого, упаковки РАО, сформированные на основе НЗК-150-1,5П, соответствуют требованиям к огнестойкости.

Контейнер обеспечивает возможность загрузки во внутреннюю полость четырех бочек (общим объемом 800 л), применяемых на Белорусской АЭС для первичной упаковки ТРО, или 1,5 м³ переработанных РАО без упаковки в бочки. Классическая схема размещения бочек – симметричная относительно центра и стенок контейнера (рис. 1а).

Эффективность использования различных упаковок для заданного количества РАО определяется в общем случае коэффициентом полезного использования объема ($K_{\text{по}}$), рассчитываемым как отношение объема (нетто) размещаемых РАО к объему (брутто) упаковки. При хранении РАО без бочек $K_{\text{по}}$ для НЗК-150-1,5П находится на уровне 0,4 [11]. При размещении в нем четырех бочек $K_{\text{по}}$ составляет величину 0,229.

Следует отметить, что для упаковки ОНРАО и НАО требования к сохранению изолирующей способности минимальны – на срок до размещения на захоронение [2]. То есть для этих категорий РАО защитные и изоляционные свойства НЗК-150-1,5П избыточны. Поэтому целесообразно рассмотреть альтернативные варианты контейнеризации, соответствующие требованиям к огнестойкости и габаритным размерам типоряда НЗК-150-1,5П и обеспечивающие унификацию проектных решений по ПЗРО.

Альтернативные варианты контейнеризации РАО низкой активности

При заданных габаритных размерах контейнера увеличение вместимости может быть достигнуто за счет увеличения и рационального использования его полезного объема. Поскольку горючие ТРО поступают с Белорусской АЭС в бочках, то повышение эффективности использования контейнера может быть достигнуто если обеспечить возможность размещения в контейнере больше четырех бочек или предусмотреть извлечение ТРО из бочек с последующим помещением в контейнер.

В качестве альтернативы НЗК-150-1,5П для размещения горючих ТРО Белорусской АЭС можно рассмотреть следующие варианты конечных упаковок:

- железобетонный контейнер с габаритами НЗК-150-1,5П большей вместимости за счет уменьшения толщины стенки;
- защитный металлический контейнер (КМЗ).

Железобетонный контейнер с габаритами НЗК-150-1,5П большей вместимости

В настоящее время для размещения радиоактивных отходов применяются различные виды железобетонных контейнеров, которые изготовлены из железобетона плотностью 2,4–2,6 т/м³, а массогабаритные характеристики отличаются незначительно – имеют различную толщину стенки от 110 до 150 мм. Основные технические характеристики сертифицированного НЗК-МР с толщиной стенки 110 мм, обеспечивающей огнестойкость упаковки РАО, согласно [12]: внутренний объем – 1,9 м³; толщина днища/крышки – 120/125 мм; габаритные размеры (длина×ширина×высота) – 1650×1650×1340 мм; масса без отходов – 3,54 т. Вместимость

мость указанного контейнера за счет уменьшения толщины стенки в 1,25 раза больше, чем у НЗК-150-1,5П. Однако внутренние габариты контейнера не позволяют разместить в нем более четырех бочек.

Учитывая меньшую массу и материалоемкость НЗК-МР, его использование в качестве конечной формы упаковки четырех бочек с горючими ТРО может быть целесообразно. Для данного случая $K_{ню}$ составляет величину 0,231.

Значительное увеличение вместимости рассматриваемых ТРО в НЗК-МР может быть достигнуто за счет их извлечения из бочек с последующим помещением в контейнер. В данном случае $K_{ню}$ составляет приблизительно 0,55.

Вместе с тем, следует учитывать, что применение указанного способа потребует использования на ПЗРО довольно сложной технологии переупаковки ТРО. Также необходимо выполнить обоснование огнестойкости контейнера.

Как показано в [11] для рассматриваемых низкоактивных отходов (удельная активность радиоактивного содержимого менее 104 Бк/г) не требуется дополнительная радиационная защита – упаковка служит только как изолирующий от внешней среды барьер и обеспечивает удобство обращения с отходами. То есть из-за низкой удельной активности ОНРАО и НАО значения мощности дозы гамма-излучения на внешней поверхности контейнера не более 2 мГр/ч, регламентируемые [2], заведомо будут обеспечены.

Металлический контейнер типа КМЗ

Металлические контейнеры КМЗ по размерам соответствуют бетонным контейнерам НЗК-150-1,5П. Согласно [13] контейнеры КМЗ предназначены для размещения, транспортирования, длительного хранения и захоронения твердых и отвержденных ОНРАО, НАО и САО. В них могут размещаться цементированные РАО (кубовые остатки, смолы, шламы), ТРО (прессованные, в бочках, навалом), зола от сжигания ТРО (в бочках).

Основные технические характеристики контейнеров КМЗ, согласно [9]: объем загрузки – 3,2 м³; толщина стенок/днища/крышки – 5/8/8 мм; габаритные размеры (длина×ширина×высота) – 1650×1650×1375 мм; количество размещаемых бочек объемом 200 л – 5 шт.

Тонкостенные металлические контейнеры не рассчитаны на выполнение требований к огнестойкости. Поэтому, для размещения горючих ТРО Белорусской АЭС в КМЗ могут быть рассмотрены два варианта:

- размещение в контейнере пяти бочек и заливка их цементной смесью для создания огнезащитного барьера;
- использование для контейнера огнеупорного вкладыша и размещение в нем бочек с ТРО или их содержимого навалом.

На рисунке 1б представлена схема размещения пяти бочек в контейнере КМЗ при реализации первого варианта. При этом расстояния от бочки до боковых стенок контейнера составляют 95 и 134 мм. Для рассматриваемого варианта $K_{ню}$ составляет величину 0,282.

Однако использование контейнера КМЗ с заливкой пустот между стенками контейнера и бочками цементной смесью требует обоснования огнестойкости конструкции при указанных выше расстояниях от бочек до стенок. Также необходимо достижение определенной толщины и качества цементной заливки со всех сторон бочек, что требует дополнительной конструкторской проработки.

Для второго указанного выше варианта (рис. 2) может быть применен вкладыш из материала, обеспечивающего огнестойкость контейнера: базальтовый холст, стекловолокно или другие, подобранные для получения огнеупорных характеристик согласно общим требованиям к испытаниям на огнестойкость [14]. В этом случае в контейнере с вкладышем возможно размещение пяти бочек (рис. 2а) или горючих ТРО навалом после их извлечения из первичных упаковок (рис. 2б).

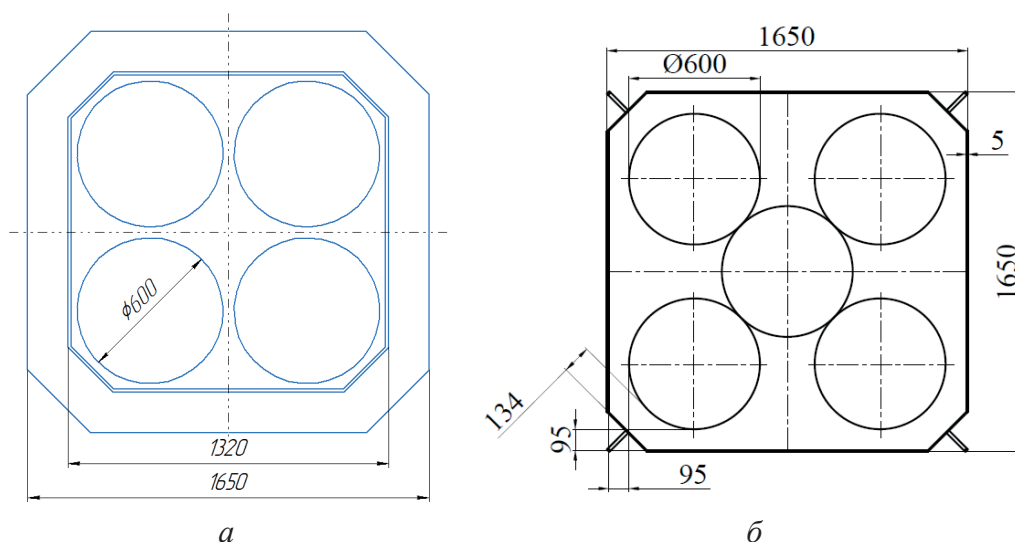


Рис. 1. Схема размещения бочек:
а – в контейнере НЗК-150-1,5П; *б* – в контейнере КМЗ

Экономический эффект от использования контейнера с огнестойким вкладышем может быть достигнут за счёт большей по сравнению с НЗК-150-1,5П вместимости. Для размещения ТРО в бочках $K_{\text{тио}}$ равен величине 0,282, для размещения ТРО навалом $K_{\text{тио}}$ достигает значения 0,69.

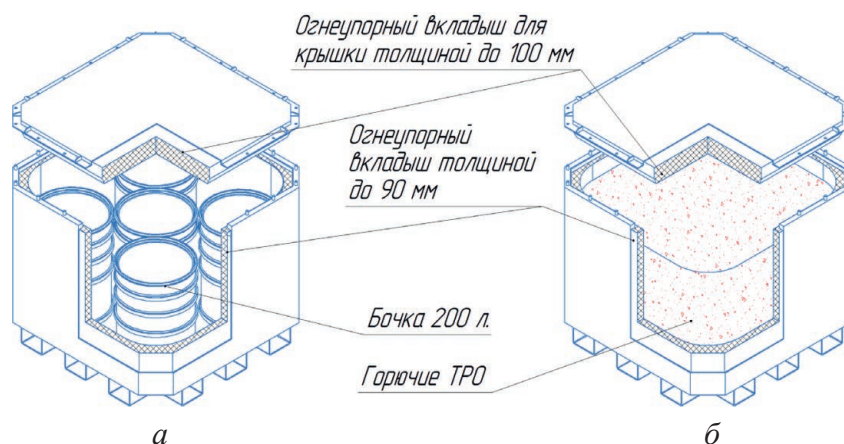


Рис. 2. Варианты создания огнестойких упаковок для горючих РАО на основе КМЗ:
а – размещение ТРО в бочках; *б* – размещение ТРО навалом

Оценка эффективности при реализации предложенных вариантов обращения с ТРО

Исходя из предварительно полученных данных для концептуального проекта ПЗРО [4], за 60 лет эксплуатации двух блоков Белорусской АЭС будет образовываться ориентировочно 720 м³ горючих ОНРАО и НАО (3600 бочек), что потребует 900 НЗК-150-1,5П для размещения данных отходов.

При использовании в качестве конечной формы упаковки НЗК-МР потребуется так же 900 контейнеров при размещении в них четырех бочек, а при размещении ТРО навалом – 379 контейнеров.

При упаковке в КМЗ пяти бочек потребуется 720 контейнера, а при размещении ТРО навалом – 296 контейнеров.

Таким образом, применение рассмотренных альтернативных вариантов контейнеризации горючих РАО низкой активности позволяет значительно снизить объемы подлежащих захоронению упаковок.

Заключение

Предложенные варианты создания конечных форм упаковок горючих РАО низкой активности Белорусской АЭС на основе железобетонных и металлических контейнеров позволяют снизить их объемы, подлежащие захоронению, по сравнению с принятым ранее в концептуальном проекте ПЗРО способом контейнеризации в НЗК-150-1,5П. Для определения рационального способа использования упаковок необходимо выполнить конструкторскую проработку рассмотренных вариантов с определением затрат на их захоронение.

Библиографические ссылки

1. Нормы и правила по обеспечению ядерной и радиационной безопасности «Безопасность при обращении с радиоактивными отходами. Общие положения» [Электронный ресурс]: утв. постановлением МЧС Респ. Беларусь, 28.09.2010, № 47 (в ред. постановления, 24.07.2017, № 33). URL: https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/a98/postanovlenie_mchs_47.pdf (дата обращения: 15.12.2024).
2. Нормы и правила по обеспечению ядерной и радиационной безопасности «Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения» [Электронный ресурс]: утв. постановлением МЧС Респ. Беларусь, 16.07.2019, № 47 (в ред. постановления, 15.05.2020 г., № 24). URL: https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/57c/postmes_16_07_19_n_47.pdf (дата обращения: 15.12.2024).
3. *Артёмов Д. Л.* Технологии обращения с радиоактивными отходами на Белорусской АЭС [Электронный ресурс]. URL: <https://disk.yandex.ru/d/HWioJYUBaUxFaQ> (дата обращения: 15.12.2024).
4. *Жемжуров М. Л., Кузьмина Н. Д.* Техническая концепция захоронения очень низкоактивных, низкоактивных и короткоживущих среднеактивных радиоактивных отходов Белорусской АЭС // *Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Серия фіз.-тэхн. навук.* 2022. № 1. С. 105–118.
5. *Жемжуров М. Л., Павлов Д. И., Жемжуров А. М.* Разработка технической концепции сооружений приповерхностного захоронения радиоактивных отходов Белорусской АЭС. Часть 1. Актуальность и нормативные требования // *Энергетическая стратегия.* 2024. № 5 (101). С. 44–47.
6. *Жемжуров М. Л., Павлов Д. И., Жемжуров А. М.* Разработка технической концепции сооружений приповерхностного захоронения радиоактивных отходов Белорусской АЭС. Часть 2. Зарубежный опыт и возможные концептуальные решения для Беларуси // *Энергетическая стратегия.* 2024. № 6 (102). С. 51–55.
7. *Жемжуров М. Л., Павлов Д. И., Жемжуров А. М.* Варианты концептуальных решений для сооружений приповерхностного захоронения радиоактивных отходов Белорусской АЭС // *Радиоактивные отходы.* 2024. № 4 (29). С. 53–65.
8. *Жемжуров М. Л., Песцова А. В., Жемжуров А. М.* Об обращении с радиоактивными отходами очень низкой активности на Белорусской АЭС // *Энергетическая стратегия.* 2024. № 4 (100). С. 44–48.
9. Контейнеры для радиоактивных отходов низкого и среднего уровня активности / Р. М. Гатауллин [и др.]. М. : Логос, 2012.
10. *Милованов А. Ф.* Пособие по расчету огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций из тяжелого бетона (к СТО 36554501-006-2006). М., 2008.
11. Многоцелевые упаковки для радиоактивных отходов / М. В. Радченко [и др.] // *Радиоактивные отходы.* 2017. №1. С. 75–83.
12. Инновационные технологии и экспертиза. НЗК-МР. [Электронный ресурс]. URL: <http://stc-intex.ru/new-et/nzk-mp.html> (дата обращения: 15.12.2024).
13. Контейнер металлический защитный КМЗ АТ-2-00.00.00.000 [Электронный ресурс] // 345-й механический завод. URL: <https://345mz.ru/kontejneryi-dlya-rao/metallicheskie-kontejneryi/kmz-m> (дата обращения: 15.12.2024).
14. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования : ГОСТ 30247.0-94. Введен 01.01.1996. 7 с.