



УДК 621. 039. 58

## РАДИАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОНТЕЙНЕРОВ НЗК-150-1,5П ПРИ КОНДИЦИОНИРОВАНИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Сорокин В.Т., Демин А.В., Кашеев В.В. (АО «Атомпроект»)  
Гатауллин Р.М., Медеяев И.А. (ОАО «345 механический завод»)

*Проведено радиационное обоснование использования бетонных контейнеров типа НЗК для кондиционирования радиоактивных отходов 3 класса.*

► **Ключевые слова:** контейнеры, радиоактивные отходы, кондиционирование, критерии приемлемости радиоактивных отходов, захоронение.

## RADIATION AND FEASIBILITY STUDY ASPECTS IN RESPECT TO APPLICATION OF NZK-150-1,5P CONTAINERS AT RADIOACTIVE WASTE CONDITIONING

Sorokin V.T., Demin A.V., Kascheyev V.V. (ATOMPROEKT JSC)  
Gataullin P.M., Medeljaev I.A. (PJSC «345 Mechanical Plant»)

*Radiation and feasibility study with regard to application of the NZK-type reinforced concrete containers for radioactive waste conditioning of the III-rd class was carried out.*

► **Key words:** containers, radioactive waste, conditioning, criteria for accepting radioactive waste, disposal.

Несмотря на успехи, достигнутые в области обращения с радиоактивными отходами (РАО), некоторые вопросы остаются дискуссионными. В их числе вопрос об упаковках РАО для захоронения. В последнее время на ряде объектов использования атомной энергии для кондиционирования РАО стали использоваться бетонные контейнеры типа НЗК, которые стали альтернативой широко применяемым металлическим бочкам объемом 0,2 м<sup>3</sup> и металлическим контейнерам.

В соответствии с Федеральным законом от 11 июля 2011 г. №190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», удаляемые кондиционированные РАО должны быть переданы Национальному оператору на захоронение.

После установления тарифа на захоронение упаковок РАО, определяемого объемом упаковки [1], перед эксплуатирующими организациями встает вопрос об эффективности использования той или иной упаковки, которая будет передаваться Национальному оператору на захоронение.

Ответ на этот вопрос следует искать в анализе современной нормативно-технической базы и в том, насколько полно те или иные упаковки отвечают современным требованиям федеральных норм и правил в области обеспечения радиационной безопасности. Важным фактором принятия решения являются, конечно, технико-экономические показатели.

В данной работе представлен анализ показателей безопасности использования контейнеров НЗК для кондиционирования РАО 3 класса.

Согласно российскому законодательству, обращение с РАО представляет собой систему последовательных стадий, включающих классификационную сортировку, переработку, кондиционирование, хранение, транспортирование и захоронение в специальных пунктах захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО).

Способ захоронения кондиционированных РАО зависит от класса отходов, определяемого радионуклидным составом и уровнем активности. Согласно [2], отходы, относящиеся к 1 и 2 классу, подлежат захоронению в пунктах глубинного захоронения, отходы, относящиеся к 3 и 4 классу, подлежат захоронению в пунктах приповерхностного захоронения, размещаемых на глубине до 100 метров или на поверхности земли.

Основное количество РАО, образующихся на предприятиях атомной энергетики и промышлен-

ности, классифицируются как отходы 3 и 4 класса. К ним относятся твердые отходы различного морфологического состава и отвержденные кубовые остатки от выпарки жидких РАО (ЖРО), отработавшие ионообменные смолы, пульпы и шламы. Радиоактивность этих отходов обусловлена, в основном, дозообразующими радионуклидами <sup>134,137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr, <sup>106</sup>Ru, а также продуктами активации <sup>60</sup>Co, <sup>54</sup>Mn, <sup>59</sup>Fe и др. [3].

Прием отходов на захоронение должен осуществляться в соответствии с критериями приемлемости (КПО), которые включают качественные и количественные требования к механическим, физическим, химическим и биологическим свойствам формы РАО, контейнерам и упаковкам РАО, предназначенным для захоронения.

В настоящее время разрабатываются общие КПО, которые будут положены в основу при разработке КПО для конкретного ПЗРО, и должны быть использованы при переработке и кондиционировании отходов на действующих предприятиях [4].

КПО для конкретного ПЗРО должны учитывать также местные климатические, геологические, гидрогеологические условия, социально-экономические факторы, а также конструкцию и технические характеристики ПЗРО.

Не останавливаясь на требованиях к форме отходов (это задача другого исследования), рассмотрим современные требования к контейнерам.

В таблице 1 представлены требования к упаковкам РАО для захоронения, заимствованные из проекта федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения» [4]. Там же представлены требования к упаковкам РАО типа А для транспортирования с целью сопоставимости с требованиями к упаковкам для захоронения [5].

Требования к упаковкам для транспортирования и захоронения сгруппированы по следующим показателям:

- радиационная безопасность;
- механическая прочность;
- герметичность;
- устойчивость к внешним воздействиям;
- сохранение защитных свойств.

В проекте федеральных норм и правил «Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения» приведены достаточно высокие требования к упаковкам РАО 3 класса и практически полностью отсутствуют требования к упаковкам РАО 4 класса, в то время как срок потенциальной

опасности этих отходов может также составлять более сотни лет.

Для кондиционирования части среднеактивных и низкоактивных отходов атомных станций специалистами АО «АТОМПРОЕКТ» (бывший ОАО «Головной институт «ВНИПИЭТ») и ОАО «345 механический завод» по заказу ОАО «Концерн Росэнергоатом» была разработана конструкция базового невозвратного защитного контейнера из композиционного материала на основе бетона, получившего условное обозначение НЗК-150-1,5П. Внешний вид контейнера представлен на рис. 1. Впоследствии были разработаны различные исполнения (модификации) этого контейнера, предназначенные для размещения реакторного

графита, солевого плава с установок глубокого упаривания, обезвоженных ионообменных смол. Характеристики разработанных упаковочных комплектов представлены в таблице 2.

При разработке бетонного контейнера в основу были положены национальные требования к кондиционированию жидких и твердых РАО [6,7], требования к транспортным упаковочным комплектам для радиоактивных веществ [5], а также учитывались достигнутые характеристики зарубежных контейнеров, разработанных во Франции, Швеции и Германии [8–10].

Требования к бетонным контейнерам по принятым показателям безопасности, заимствованные из [11], представлены в таблице 3.

Таблица 1

### Требования к упаковкам РАО для захоронения и транспортирования

Показатель безопасности	Требования к упаковкам РАО различных классов для захоронения		Требования к упаковке РАО для транспортирования типа А
	3 класс	4 класс	
Радиационная безопасность	Мощность эквивалентной дозы на поверхности упаковки не более 10,0 мЗв/час	Мощность эквивалентной дозы на поверхности упаковки не более 2,0 мЗв/час	Мощность эквивалентной дозы на поверхности транспортной упаковки не более 2,0 мЗв/час и на расстоянии 1 м – не более 0,1 мЗв/час
Механическая прочность упаковки	Механическая прочность должна быть не ниже требований, установленных правилами транспортирования для упаковок типа А. Прочность при сжатии для: - упаковки $\geq 5$ МПа; - контейнера $\geq 0,35$ МПа	Не ниже требований, установленных правилами транспортирования для промышленных упаковок радиоактивных материалов	Конструкция упаковки должна выдерживать пятикратное значение массы упаковки. Конструкция упаковки должна выдерживать испытания сбрасыванием на мишень с высоты 0,9 м при массе упаковки от 5000 кг до 10000 кг
Герметичность			Отсутствие протечек и снижения внутреннего давления при создании гидравлического давления внутри контейнера 75 кПа в течение 30 минут
Устойчивость к внешним воздействиям	Упаковки РАО 3 класса должны выдерживать пожар с температурой 800 °С в течение 0,5 часа с потерей содержимого не более 20%		Конструкция упаковки должна быть рассчитана на диапазон температур компонентов упаковочного комплекта от минус 40 до плюс 70 °С



Показатель безопасности	Требования к упаковкам РАО различных классов для захоронения		Требования к упаковке РАО для транспортирования типа А
	3 класс	4 класс	
Сохранение защитных свойств	Упаковки РАО должны сохранять структурную стабильность, прочность и изолирующие свойства при обращении с ними на ПЗРО и после захоронения	Изолирующая способность упаковки РАО должна сохраняться до размещения на захоронение	Утечка радиоактивного вещества после испытаний на нормальные условия транспортирования не допускается при снижении давления окружающей среды до 25 кПа
	Сохранение изолирующей способности упаковки РАО не менее 100 лет		Ослабление защитных свойств упаковки после испытаний на соответствие нормальным условиям транспортирования допускается не более 20%
	Сохранение прочности и изолирующих свойств после 30 циклов замораживания и оттаивания		



Рис. 1. Внешний вид контейнера НЗК-150-1,5П с вкладышем

Таблица 2

### Характеристики контейнеров НЗК

Обозначение типа	Способ загрузки	Полезная емкость, м <sup>3</sup>	Толщина стенок, мм	Габаритные размеры, мм	Масса, т	Масса с отходами, т, не более
НЗК-150-1,5 П	В бочках	0,8	150	1650×1650×1375	4,3	7,3
НЗК – 150-1,5П	Наливом	1,5	150	1650×1650×1375	4,3	7,3
НЗК-150-1,5 П(С)	Наливом	1,15	150 +(2 мм сталь 3)	1650×1650×1375	4,5	7,3
НЗК – 150-1,5П (ИОС)	Засыпкой	1,5	150	1650×1650×1375	4,3	5,5
НЗК – 150-1,5П (ИОС)	В емкости	1,15	150+(6 мм сталь 3)	1650×1650×1375	4,5	6,0

Таблица 3

### Основные требования к контейнерам НЗК

Показатель безопасности	Требования к контейнерам
Радиационная безопасность	Мощность дозы на поверхности упаковки не более 2,0 мЗв/ч, а на расстоянии 1 м – 0,1 мЗв/ч. Допускается отступление от регламентированных значений мощности дозы на наружной поверхности НЗК при условии не превышения основного предела доз для персонала группы А
Механическая прочность	Контейнер должен выдерживать: - статическую нагрузку на сжатие в течение 24 ч, равную пятикратному значению массы заполненного контейнера, моделирующую нагрузку при штабелировании; - динамическую нагрузку, возникающую при падении контейнера с отходами на жесткое основание с высоты 0,5 м на днище и на угол между днищем и стенкой
Герметичность	Конструкция НЗК должна обеспечивать: - герметичность соединений при внутреннем гидравлическом давлении 75 кПа; - утечку по воздуху не более 500 Па/л·с <sup>-1</sup>
Устойчивость к внешним воздействиям	Выдерживает проектное землетрясение 7 баллов, температурное воздействие от -50 до +70 °С. Предел огнестойкости – 0,75 ч
Сохранение защитных свойств	Не менее 50 лет при хранении и до 300 лет при захоронении РАО в ПЗРО

Для подтверждения заявленных требований был выполнен большой комплекс экспериментальных исследований конструкционного материала контейнера и проведены испытания опытных образцов контейнеров. По экспериментальным данным выполнено расчетное обоснование изолирующих свойств и долговечности контейнера в процессе хранения и захоронения упаковок РАО в приповерхностных ПЗРО.

В качестве конструкционного материала контейнера были разработаны 20 составов бетонов класса В50 (средняя прочность на сжатие – 70 МПа).

Испытание разработанных бетонов выявило следующие характеристики:

- морозостойкость бетонов составила более F 400 (после 400 циклов образцы были сняты с испытаний, так как требования ГОСТ [11] составляют всего 200 циклов);
- водонепроницаемость всех образцов бетонов составила более W 14 (требования ГОСТ [11] составляют W 10);
- коэффициент диффузии <sup>137</sup>Cs в бетоне при максимальном влагонасыщении 5 – 8% не превысил 2,4·10<sup>-14</sup> м<sup>2</sup>/с, что ниже требуемого значения по ГОСТ [10], равного 1,0·10<sup>-13</sup> м<sup>2</sup>/с.

Разработанный контейнер НЗК с использованием в качестве конструкционного материала бетона плотностью  $2,4 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  и толщиной стенки 150 мм обеспечивает требование радиационной безопасности 2 мЗв/ч на поверхности контейнера при размещении низкоактивных РАО 3 класса с активностью до  $10^7 \text{ Бк/кг}$ .

Соблюдение указанных пределов обусловлено требованиями к контейнеру как к транспортной упаковке типа А и возможностью вывоза упаковок в ПЗРО без дополнительных защитных средств.

Для среднеактивных отходов 3 класса с удельной активностью  $1,0 \cdot 10^9 \text{ Бк/кг}$ , определяющейся  $^{137}\text{Cs}$ , или с удельной активностью  $1,0 \cdot 10^8 \text{ Бк/кг}$ , определяющейся  $^{60}\text{Co}$ , могут быть изготовлены контейнеры НЗК с толщиной стенки 150 мм с использованием бетона плотностью  $3,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 - 4,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  и внутренней металлической облицовкой толщиной 8–10 мм.

Эффективным способом снижения мощности дозы у поверхности контейнера, наряду с увеличением плотности бетона, является увеличение толщины стенок.

Так, при увеличении толщины стенок контейнера со 150 до 300 мм и при использовании бетона плотностью  $3,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 - 4,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  и внутренней металлической облицовки толщиной 8–10 мм для отходов, содержащих  $^{137}\text{Cs}$ , удельная активность может быть увеличена до  $1,0 \cdot 10^{10} \text{ Бк/кг}$ , а для отходов, содержащих  $^{60}\text{Co}$ , – до  $1,0 \cdot 10^9 \text{ Бк/кг}$ . Дальнейшее увеличение толщины стенок, по-видимому, не целесообразно из-за низкого коэффициента использования объема контейнера.

При необходимости мощность дозы на поверхности упаковки может достигать 10 мЗв/ч [4], в условиях неперевышения основного предела доз для персонала группы А при обращении с упаковками и соблюдении транспортных норм транспортирования.

Механическая прочность контейнера подтверждена натурными испытаниями на статические и динамические нагрузки.

Проведенные испытания загерметизированных контейнеров показали отсутствие намокания на внешней поверхности при внутреннем давлении воды 100 кПа и утечке по воздуху более 500 Па/л·с<sup>-1</sup>.

Специальными пожарно-техническими расчетами показано, что при хранении горючих битумированных отходов в контейнерах НЗК-150-1,5П при возникновении гипотетического пожара за счет возгорания битума в одном из разрушенных контей-

неров развитие пожара по помещению хранилища невозможно в связи с тем, что предел огнестойкости стенок контейнера составляет 0,75 часа.

Изолирующие свойства контейнера и их сохранность определяют надежность и долговечность контейнеров.

Делокализация радионуклидов из контейнеров может происходить под влиянием процессов растворения соединений, содержащих радионуклиды, и диффузии радионуклидов в поровой влаге стенок контейнера, в защитных инженерных барьерах и в геологической формации (при захоронении в приповерхностном пункте захоронения) и за счет диффузии в поровой влаге стенок контейнера и ее испарения с внешней поверхности стенок контейнера (при временном хранении в вентилируемом помещении).

Для описания процесса распространения радионуклидов при захоронении выбрана математическая модель, основанная на решении нестационарного одномерного уравнения диффузии для неоднородных сред [12]. Диффузионные коэффициенты являются кусочно-постоянными функциями, то есть сохраняют постоянные значения внутри каждой среды:

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (D \frac{\partial C}{\partial x}) - \lambda \cdot R \cdot C(x, t),$$

где  $C(x, t)$  — концентрация радионуклида в поровой влаге (Бк/м<sup>3</sup>);  $t$  — время хранения (год);  $x$  — координата (м), ось  $X$  перпендикулярна стенке контейнера, начало координат соответствует внутренней поверхности стенки;  $\lambda$  — постоянная распада (1/год);  $D(x)$  — коэффициент внутренней диффузии (м<sup>2</sup>/год);  $R(x)$  — коэффициент задержки.

Все расчеты оценок безопасности для контейнера НЗК проведены для  $^{137}\text{Cs}$ , что объясняется его значительным процентным содержанием в отходах, продолжительным периодом полураспада, сравнительно большой диффузионной подвижностью в бетоне.

Максимальная активность  $^{137}\text{Cs}$  в отходах, принятая для расчетов, составляет  $4,25 \cdot 10^8 \text{ Бк/кг}$ . При оценке скорости делокализации радионуклидов из контейнеров консервативно предполагалось, что все защитные инженерные барьеры, кроме контейнеров, разрушены, и рассматривалась диффузия радионуклидов через стенку контейнера и геологическую породу неограниченной протяженности. В качестве геологической породы при расчетах рассматривался песок, как среда, обладающая сравнительно большой диффузионной проницаемостью.

Результаты расчетов определили консервативную оценку для концентрации радионуклидов на внешней поверхности стенки контейнера. Изменение концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в стенке контейнера для таких условий показано на рис. 2. Расчет проведен для бетонной стенки толщиной 150 мм и  $D_{\text{эфф}} = 3 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$ , для песка  $D_{\text{эфф}} = 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ . В качестве критерия безопасности выбрано не превышение за пределами контейнера величины  $\text{УВ}_{\text{вода}}$ . Горизонтальная линия на рисунке соответствует величине  $\text{УВ}_{\text{вода}}$  для  $^{137}\text{Cs}$ , равной  $1,1 \cdot 10^4 \text{ Бк/м}^3$ . График на рис. 2 демонстрирует, что НЗК, изготовленные из бетона с  $D_{\text{эфф}}$ , равным  $3 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$ , обеспечат выполнение выбранного критерия безопасности для  $^{137}\text{Cs}$  и на наружной стенке контейнера

цезий никогда не достигнет концентрации уровня вмешательства.

Для обоснования долговечности контейнеров были рассмотрены воздействия природных факторов на конструкционный материал при хранении и захоронении, включая газовую коррозию (карбонизацию), морозное разрушение, выщелачивание извести при воздействии подземных вод. Проведенными расчетами показано, что защитные свойства контейнеров НЗК сохраняются не менее 50 лет при хранении и до 300 лет при захоронении РАО в приповерхностных ПЗРО.

Полный анализ показателей безопасности, в том числе обоснование долговечности контейнеров НЗК, представлен в монографии [13].

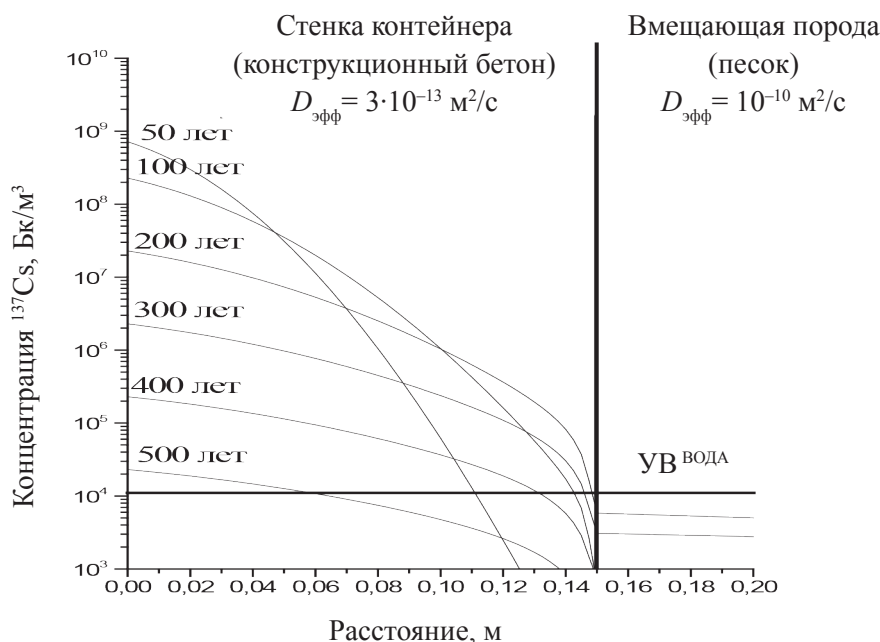


Рис. 2. Концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в паровой влаге на внешней стенке контейнера при захоронении упаковок в приповерхностное хранилище:  $D_{\text{эфф}} = 3 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$

### Заключение

Анализ показателей безопасности позволяет сделать вывод, что бетонные контейнеры типа НЗК, разработанные и используемые для кондиционирования РАО 3 класса, в полной мере отвечают разрабатываемым критериям приемлемости РАО для захоронения в части требований герметичности, защитных свойств, долговечности, огнестойкости и соответствуют требованиям, предъявляемым к транспортным упаковкам типа А.

Использование контейнеров НЗК для кондиционирования РАО 3 класса обеспечивает радиационную безопасность для персонала и окружающей среды при длительном хранении и захоронении упаковок РАО.

## Список литературы

1. О первоначальном установлении тарифов на захоронение радиоактивных отходов. Приказ Минприроды России от 13.03.2013. № 89.
2. О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов. Постановление Правительства РФ от 19 октября 2012 № 1069.
3. Козлов П.В., Горбунова О.А. Цементирование как метод иммобилизации радиоактивных отходов. — Озерск, РИЦ ВРБ ФГУП «ПО «Маяк», 2011.
4. Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения. Проект нормативного документа. Ядерная и радиационная безопасность, № 1(71), 2014.
5. ГОСТ 16327-88. Комплекты упаковочные транспортные для радиоактивных веществ. Общие технические условия.
6. Сбор, переработка, хранение и кондиционирование жидких радиоактивных отходов. Требования безопасности. НП-019-2000. М., НТЦ ЯРБ, 2000.
7. Сбор, переработка, хранение и кондиционирование твердых радиоактивных отходов. Требования безопасности. НП-020-2000. М., НТЦ ЯРБ, 2000.
8. Containers for Packaging of Solid Low and Intermediate Level Radioactive Wastes. Vienna: IAEA, 1993. Technical Reports Series. No. 355.
9. Applications of fibre reinforced concrete containers in France and Clovakia // Verdier A., Delgrande J., Remias V. The Fifth International Conference on Radioactive Waste Management and Enviromental Remediation. Berlin, Sept. 3—7, 1995. Vol. 2.
10. Nitsche F., Collin F. W. Transport and Disposal Requirements for some Selected Waste Shipments to the Konrad Repository // Ramtrans. 1994. Vol. 5.
11. ГОСТ Р 51824-2001. Контейнеры защитные невозвратные для радиоактивных отходов из конструкционных материалов на основе бетона.
12. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М, ГИТТА, 1952.
13. Гатауллин Р.М., Давиденко Н.Н., Свиридов Н.В., Сорокин В.Т. и др. Контейнеры для радиоактивных отходов низкого и среднего уровня активности: монография. Под редакцией Сорокина В.Т. М, Логос, 2012.

