

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-3-129-135>

УДК 621.6; 629.039.58

ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Д. И. Абулгазиева*, А. К. Мухамедиев, М. К. Сейсенбаева, В. А. Поспелов,
В. В. Яковлев, Ю. Ю. Бакланова, А. Г. Коровиков

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

* E-mail для контактов: davydenko@nnc.kz

В статье представлены результаты работ по обоснованию безопасности транспортировки проб жидких радиоактивных отходов (ЖРО) из ТОО «МАЭК», г. Актау в РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», г. Курчатов. На начальном этапе работ, на основании исходных данных о свойствах ЖРО (активность, нуклидный состав), для транспортировки проб был спроектирован и изготовлен специальный транспортный упаковочный комплект (ТУК), отвечающий требованиям нормативных документов Республики Казахстан в области использования атомной энергии. Для обоснования радиационной безопасности выполнены радиационные расчеты по оценке мощности эффективной дозы гамма-излучения на поверхности ТУК и подтверждена безопасность транспортировки проб ЖРО.

Ключевые слова: РУ БН-350, радиоактивные отходы, транспортировка, освобожденная упаковка, транспортный упаковочный комплект, радиационная безопасность.

ВВЕДЕНИЕ

В результате эксплуатации опытно-промышленной реакторной установки (РУ) БН-350 с реактором на быстрых нейтронах и жидкометаллическим теплоносителем, в период с 1973 года по 1999 год, и при проведении мероприятий по выводу РУ из эксплуатации, было накоплено достаточно большое количество ЖРО. На сегодняшний день все накопленные ЖРО РУ БН-350 представляют собой, в основном, солевые растворы, а также пульпы ионообменных материалов и органические (маслосодержащие) радиоактивные отходы. Химический состав ЖРО представлен в таблице 1 [1].

Для обоснования выбора оптимальной технологии переработки ЖРО РУ БН-350 необходимо выполнить комплекс научно-исследовательских работ,

а для этого необходимо осуществить доставку проб различных типов ЖРО на комплекс исследовательских реакторов «Байкал-1» РГП НЯЦ РК. С целью соблюдения требований нормативно-правовых актов Республики Казахстан в области использования атомной энергии при транспортировке, выполнены работы по обоснованию безопасности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Транспортировка радиоактивных отходов (РАО) является ответственным мероприятием, требующим соблюдения целого ряда требований безопасности. Для этого используются специальные ТУК и специализированные автомобили, которые надежно защищают персонал и окружающую среду от вредного воздействия РАО.

Таблица 1. Химический состав ЖРО

Емкость и место отбора		Сухой остаток	Хлориды	Жесткость	Щелочность	Сульфаты	Нитраты	Нитриты	Кремнекислота	Тип ЖРО
		г/л	г/л	г-экв/л	гэкв/л	г/л	г/л	г/л	г/л	
Б-02/1	верхний уровень	400,0	38,99	0,025	0,18	30,38	51,78	0,79	0,45	кубовый остаток
	средний уровень	430,0	35,45	0,02	0,26	36,26	41,43	0,89	0,49	
	нижний уровень	530,0	42,54	0,018	0,28	29,4	44,9	0,84	0,7	
Б-02/2	верхний уровень	170,0	18,07	0,035	0,07	11,76	31,07	0,49	0,74	кубовый остаток
	средний уровень	190,0	17,9	0,025	0,06	18,68	35,06	0,44	0,39	
	нижний уровень	200,0	17,72	0,065	0,09	13,23	30,5	0,69	0,71	
Б-02/5	верхний уровень	180,0	28,36	0,022	0,04	9,31	41,63	0,59	0,34	кубовый остаток
	средний уровень	170,0	18,25	0,024	0,05	6,86	21,3	0,66	0,36	
	нижний уровень	180,0	17,91	0,023	0,041	5,88	20,52	0,68	0,45	
Б-02/6	верхний уровень	масло								масло, полифенил-метилсилоксаны Na-K
	средний уровень	150,0	10,6	0,011	2,1	4,9	2,35	1,33	1,18	
	нижний уровень	160,0	1,40	0,037	2,4	8,57	71,88	0,44	0,63	

В мире разработаны и достаточно широко используются контейнеры для транспортировки и хранения твердых РАО. Сложнее дело обстоит с транспортировкой ЖРО. В основном для их транспортировки используются специальные цистерны или специализированные автомобили, оснащенные системами контроля уровня жидкости, подачи и слива жидкости, а также системой контрольно-измерительных приборов и автоматики для отслеживания состояния функциональных систем защитного контейнера, клапанов и других элементов. В целом, необходимо отметить, что РАО редко транспортируют в жидком виде, ввиду необходимости обеспечения более высоких требований безопасности и технических особенностей процесса [2, 3]. ТУКи для транспортировки ЖРО широко не представлены на внутреннем рынке Казахстана. Кроме того, для выполнения научно-исследовательской работы не требуются большие объемы ЖРО, поэтому, РГП НЯЦ РК самостоятельно разработал конструкторскую документацию упаковки для транспортировки ЖРО.

ЖРО РУ БН-350

Все ЖРО РУ БН-350 представляют собой жидкости с щелочной средой $pH > 12$, с высоким содержанием солей, имеющие желто-коричневую окраску. Соли обусловлены высоким содержанием хлоридов, сульфатов, нитратов. Соли, входящие в состав ЖРО, представлены катионами щелочных металлов (Na, K). Маслосодержащие ЖРО (емкость Б-02/6) представляют собой вязкие жидкости с щелочной реакцией среды $pH > 10,8$.

Соотношение компонентов в ЖРО существенно варьируется. При этом диапазон солесодержания в отходах составляет от 150 до 530 г/л [1].

Требования к упаковке

Транспортировка РАО в Казахстане осуществляется в ТУК в соответствии с требованиями правил [4]. Существует несколько типов ТУК в зависимости от находящегося в них радиоактивного содержимого. Согласно правилам, все упаковки должны соответствовать общим требованиям. К ним относятся требования к конструкции упаковки, размеру, элементам крепления, клапанам и запорным устройствам и т.п. К упаковкам с жидким содержимым предъявляются дополнительные требования:

- конструкция упаковки должна предусматривать наличие дополнительного не заполняемого объема для компенсации температурных изменений содержимого, динамических эффектов и динамики заполнения;
- упаковка должна иметь достаточное количество абсорбирующего материала для поглощения удвоенного объема жидкого радиоактивного содержимого, расположенного так, чтобы в случае утечки осуществлялся его непосредственный контакт с жидкостью;
- упаковка должна иметь систему герметизации, состоящую из первичной внутренней и вторичной

наружной изолирующих частей, сконструированных так, чтобы обеспечивалось удержание жидкого радиоактивного содержимого внутри вторичной наружной изолирующей части даже в случае утечки из первичной внутренней изолирующей части.

Ввиду необходимости небольшого объема ЖРО, было принято решение рассмотреть в качестве ТУК освобожденную упаковку. Как и другие типы упаковок, освобожденная упаковка должна содержать только те материалы, которые разрешены для данной конструкции упаковки. В частности, для освобожденной упаковки установлены следующие требования к количеству и параметрам, загружаемого материала:

- активность содержимого не должна превышать значений пределов активности, указанных в правилах [4];
- уровень излучения в любой точке внешней поверхности освобожденной упаковки не должен превышать 5 мкЗв/час над естественным фоном местности.

Предел активности для освобожденной упаковки с жидким содержимым в качестве «материала» составляет значение $10^{-4}A_2$, где A_2 – табличное значение активности какого-либо радионуклида, за исключением радиоактивного материала особого вида, используемое для определения пределов активности.

Разработка упаковки

В соответствии с предъявляемыми к освобожденным упаковкам требованиями была разработана конструкторская документация на контейнер (рисунок 1). Корпус освобожденной упаковки представляет собой сварную конструкцию в форме параллелепипеда. Крышка защитного корпуса крепится с помощью болтовых соединений и уплотняется прокладкой из тепломорозокислотощелочестойкой техпластины марки 1-И-ТМКЩ-С-2 ГОСТ 7338-90. Основной конструкционный материал корпуса и крышки – сталь Ст.3. Внутренняя и внешняя поверхности корпуса и крышки покрыты эмалью ПФ-115.

Во внутренней полости контейнера установлена радиационная защита, обеспечивающая снижение уровня излучения от ее радиоактивного содержимого на внешней поверхности упаковки до установленного значения для освобожденных упаковок – все поверхности защищены двумя свинцовыми пластинами толщиной 1 см каждая.

Пробы ЖРО помещаются в специальные емкости в количестве 5 штук, которые с помощью болтов крепятся внутри упаковки на установленном каркасе (рисунок 2). Объем емкости составляет 1,3 л, допустимое заполнение – не более 1 л. Максимальный вес заполненной емкости – 3,2 кг. Содержимое емкости надежно герметизируется крышкой с прокладкой, которые фиксируются на горловине гайкой. Материалом основных деталей емкости является сталь 12Х18Н10Т ГОСТ 9941-81.

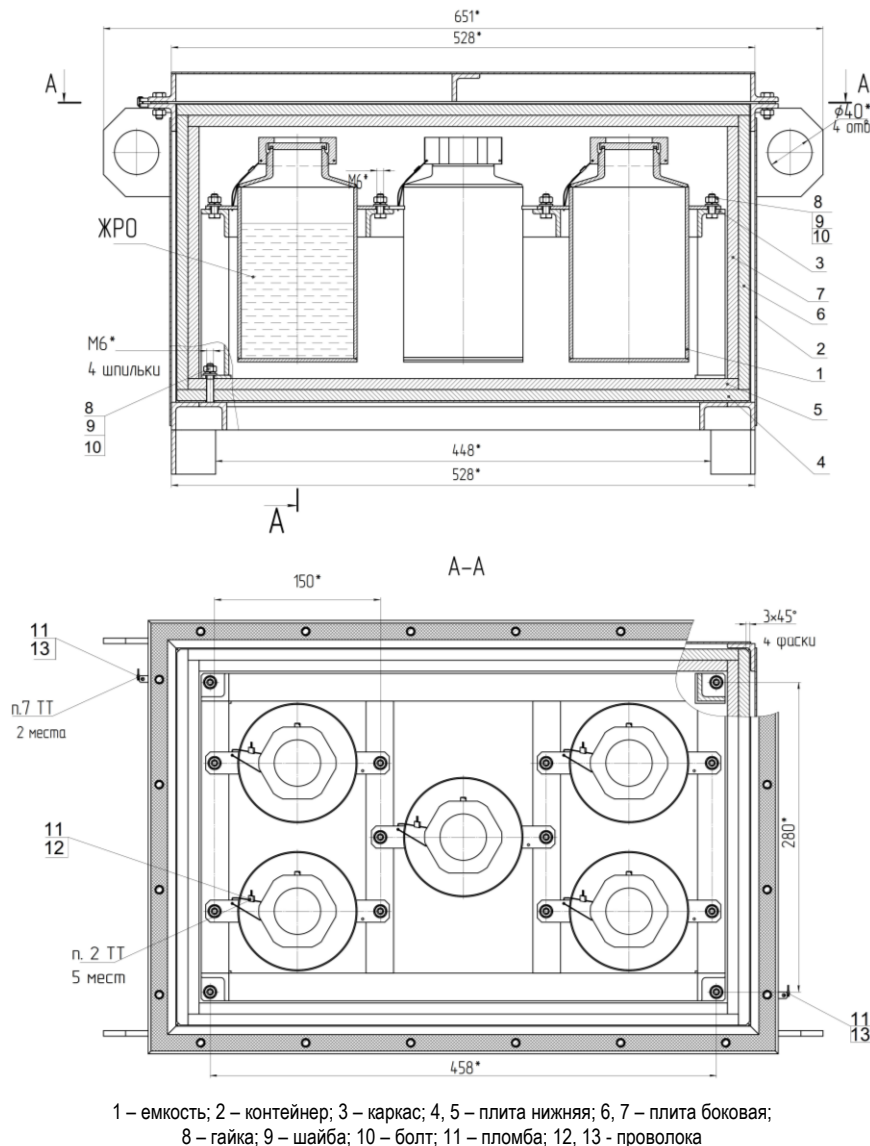


Рисунок 1. Сборочный чертеж освобожденной упаковки

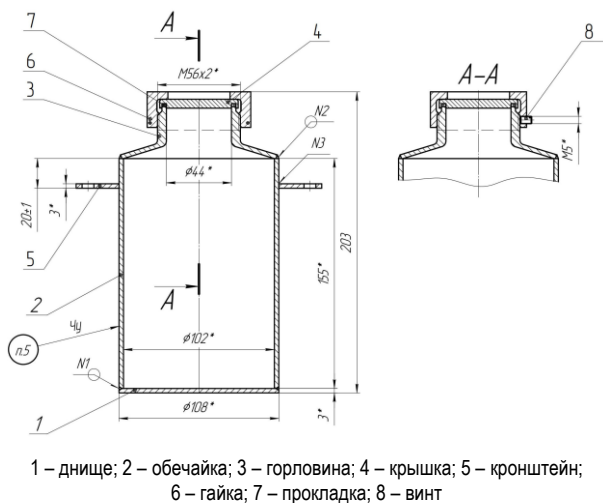


Рисунок 2. Емкость под ЖРО

После установки емкостей с пробками ЖРО, свободный объем упаковки, составляющий 24 литра, заполняется сорбирующим материалом, который в случае протечек полностью поглотит жидкость и предотвратит выход радиоактивного материала за пределы упаковки. При максимальном объеме перевозимых ЖРО – 5 л, объем сорбирующего материала составляет в 5 раз больше объема ЖРО.

Максимальный вес заполненного контейнера – 205 кг. Для осуществления строповки контейнера на его боковых стенках имеются петли, рассчитанные на грузоподъемность 262,5 кгс.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Для проведения научно-исследовательской работы определены места отбора необходимых проб из емкостей хранилища ЖРО РУ БН-350. Отбор проб осуществлялся с применением штатной системы, включающей вакуумный насос, пробоотборный мон-

жус и арматуру. В результате проведенного отбора проб из мест хранения специалистами ТОО «МАЭК» были представлены следующие данные (таблице 2).

Таблица 2. Результаты отбора проб [5]

№ п/п	Место отбора	Точка отбора	Радионуклид	Текущая активность, МБк/л
1	Емкость Б-02/01	верхний уровень	^{137}Cs	17,4
2		средний уровень	^{137}Cs	13,0
3		нижний уровень	^{137}Cs	21,1
4	Емкость Б-02/02	верхний уровень	^{137}Cs	10,7
5		средний уровень	^{137}Cs	10,4
6		нижний уровень	^{137}Cs	11,0
7	Емкость Б-02/05	верхний уровень	^{137}Cs	11,5
8		средний уровень	^{137}Cs	10,4
9		нижний уровень	^{137}Cs	10,0
10	Емкость Б-02/06	верхний уровень	^{137}Cs	0,4
11		средний уровень	^{137}Cs	0,7
12		нижний уровень	^{137}Cs	15,5

Таблица 3. Распределение проб в освобожденных упаковках

Контейнер	Место отбора пробы	Объем пробы, л	Активность пробы, МБк
Освобожденная упаковка №1	Емкость Б-02/1 (верхний уровень)	1,0	17,4
	Емкость Б-02/1 (средний уровень)	1,0	13,0
	Емкость Б-02/2 (верхний уровень)	1,0	10,7
	Емкость Б-02/2 (средний уровень)	1,0	10,4
	Емкость Б-02/6 (верхний уровень)	1,0	0,4
Активность освобожденной упаковки №1			41,5
Освобожденная упаковка №2	Емкость Б-02/1 (нижний уровень)	1,0	21,1
	Емкость Б-02/2 (нижний уровень)	1,0	11,0
	Емкость Б-02/5 (верхний уровень)	1,0	11,5
	Емкость Б-02/5 (средний уровень)	1,0	10,4
	Емкость Б-02/6 (средний уровень)	1,0	0,7
Активность освобожденной упаковки №2			54,7
Освобожденная упаковка №3	Емкость Б-02/5 (нижний уровень)	1,0	10,0
	Емкость Б-02/6 (нижний уровень)	1,0	15,5
	Емкость Б-02/6 (верхний уровень)	1,0	0,4
	Емкость Б-02/6 (средний уровень)	1,0	0,7
	Емкость Б-02/6 (нижний уровень)	1,0	15,5
Активность освобожденной упаковки №3			42,1



а)



б)

Рисунок 3. Изготовленные контейнеры

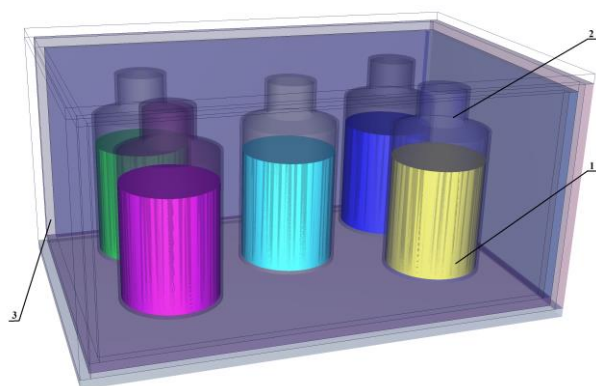
Радионуклидный состав ЖРО представлен в основном ^{137}Cs , наличие других радионуклидов незначительное и составляет менее 0,01 %. Поэтому, предел активности для освобожденной упаковки с ЖРО РУ БН-350 был рассчитан по нуклиду ^{137}Cs .

Согласно правилам [4] значение коэффициента A_2 для ^{137}Cs составляет 0,6 ТБк, а предел активности для освобожденной упаковки составляет 60 МБк.

Для транспортировки проб ЖРО были изготовлены три контейнера с максимальным объемом перевозимых проб – 15 л (рисунок 3). На основании объемов и свойств ЖРО определена схема распределения проб в контейнерах (таблица 3).

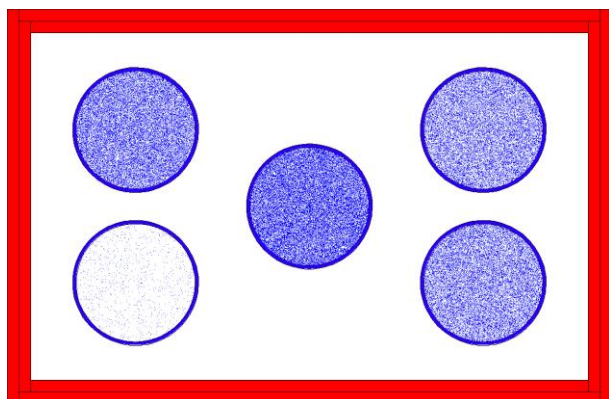
Как видно из таблицы 2, суммарная активность содержимого каждой отдельной упаковки не превышает значения предела активности для освобожденной упаковки, рассчитанного для ЖРО РУ БН-350.

Для обоснования безопасности транспортировки проведены радиационные расчеты. Радиационные расчеты были выполнены в 3D геометрии с помощью кода MCNP5 [6]. Код основан на использовании метода Монте-Карло, с непрерывными по энергии сечениями и библиотеками констант ENDF/B-5,6 [7]. Расчетная модель MCNP контейнера с ЖРО представлена на рисунке 4 (а). Граничные условия в MCNP задаются через описание геометрии (например, ячеек).



1 – ЖРО, 2 – емкости для проб, 3 – свинцовая защита

а) общий вид 3D-модели



б) схема распределения источника ионизирующего излучения в упаковке №1

Рисунок 4. Расчетная модель

Для каждой из упаковки были заданы равномерные распределения источника ионизирующего излучения, пример для упаковки №1 представлен на рисунке 4 (б). Для достоверности результатов, количество историй (трэков частиц) составило 10^{10} частиц (фотонов) в каждом расчете.

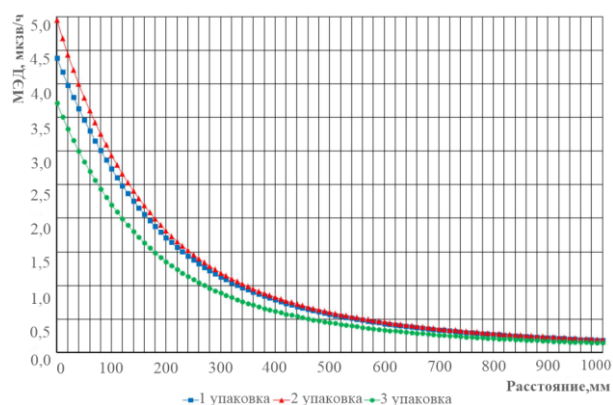
Для консервативности расчета радиационной безопасности за материал ЖРО была принята жидкость с плотностью в $1,0 \text{ г/см}^3$, которая имеет наименьшую способность к поглощению фотонов, а упаковка заполнена воздухом с плотностью $0,0012 \text{ г/см}^3$. Материальный состав упаковки соответствует исходным данным.

Итоговые значения мощности эквивалентной дозы (МЭД) [8] для всех трех освобожденных упаковок представлены в таблице 4, а диаграммы зависи-

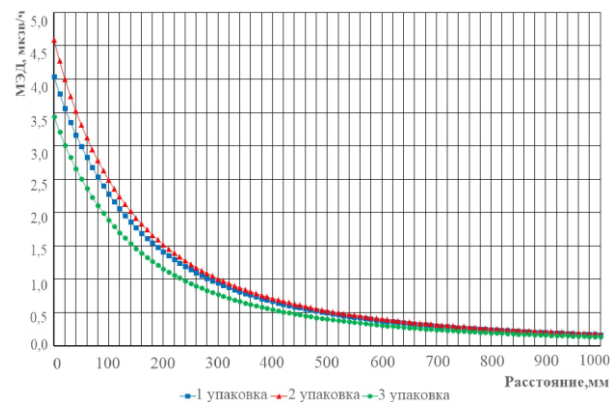
мости МЭД от расстояния до поверхности упаковки на рисунке 5. Для всех расчетов погрешность σ составляет менее 0,0011 в относительном значении.

Таблица 4. Значения МЭД на различном удалении от поверхности упаковки

Расстояние, мм	МЭД, мкЗв/ч, $\sigma < 0,0011$					
	Освобожденная упаковка №1		Освобожденная упаковка №2		Освобожденная упаковка №3	
	сбоку	сверху	сбоку	сверху	сбоку	сверху
20 (вплотную)	3,98	3,56	4,44	4,00	3,33	3,01
100	2,74	2,28	2,94	2,49	2,20	1,89
1000	0,19	0,17	0,20	0,18	0,15	0,14



а) сбоку от поверхности освобожденной упаковки



б) сверху от поверхности освобожденной упаковки

Рисунок 5. Диаграммы зависимости МЭД от расстояния до поверхности упаковки

Результаты расчета показали, что максимальное значение МЭД на поверхности освобожденных упаковок с пробами ЖРО РУ БН-350 не превышает значения 5 мкЗв/ч .

Таким образом, основные критерии безопасности при транспортировке ЖРО РУ БН-350 в освобожденной упаковке выполнены:

– активность содержимого не превышает 60 МБк по нуклиду ^{137}Cs

– уровень излучения в любой точке внешней поверхности освобожденной упаковки не превышает 5 мкЗв/час над естественным фоном местности;

– конструкция упаковки обеспечивает удержание жидкого радиоактивного содержимого внутри вторичной наружной изолирующей части даже в случае утечки из первичной внутренней изолирующей части, за счет наличие свободного объема для заполнения абсорбирующим материалом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Безопасность при транспортировке радиоактивных материалов обеспечивается соблюдением ряда требований, обозначенных в нормативно-технических документах в области перевозок радиоактивных грузов. Транспортировка радиоактивных материалов в освобожденных упаковках ограничивается пределом активности ее содержимого, а также значением мощности излучения на поверхности контейнера. Перевозка пятнадцати проб ЖРО РУ БН-350 в освобожденных упаковках из емкостей хранилища ТОО «МАЭК» по маршруту город Актау – город Курчатов была выполнена в соответствии с установленными требованиями и выполнением всех условий безопасности при транспортировке радиоактивных материалов.

Работа проводилась при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках программы BR24993140 «НИР по обоснованию выбора и реализации технологии переработки жидких радиоактивных отходов».

ЛИТЕРАТУРА

1. «Разработка технико-экономического обоснования (ТЭО) проекта вывода из эксплуатации РУ БН-350», Книга 2, Техничко-технологические решения, Р01.2020.000.02.ТЭО, ОО «МЭТР» Москва, 2020 г.
2. Иванов, А.Б. Актуализация методов оценки рисков при транспортировании жидких радиоактивных отходов с учетом новейших технологий упаковывания / А.Б. Иванов, С.В. Петров // Атомная энергия. – 2022. – Т. 132, № 5. – С. 305–312.
3. Смирнов, П.И. Разработка и применение новых материалов для транспортных упаковочных комплектов для высокоактивных жидких радиоактивных отходов /

П.И. Смирнов, М.В. Орлов // Вопросы радиационной безопасности. – 2023.

4. Правила транспортировки ядерных материалов, радиоактивных веществ и радиоактивных отходов от 28 мая 2021 года №183.
5. Протокол отбора проб ЖРО из мест хранения в количестве 15 штук, №02-09-01/1 от 30.12.2024 г.
6. Briesmeister, J.F. MCNP - a general Monte-Carlo Code for neutron and photon Transport / J.F. Briesmeister [et al.] – Los Alamos. – 1997. – LA-7396M.
7. MCNP: Neutron Benchmark / Problems Daniel J., Whalen David A., Cardon Jennifer L., Uhle John S., Hendricks.- LA-12212, DE92 004710. – November 1991. – 87 p.
8. Гигиенические нормативы. Санитарно-эпидемиологические требования к обеспечению радиационной безопасности, утвержденные приказом Министра национальной экономики Республики Казахстан № 155 от 27.02.2015.

REFERENCES

1. “Razrabotka tekhniko-ekonomicheskogo obosnovaniya (TEO) proekta vyvoda iz ekspluatatsii RU BN-350”, Kniga 2, Tekhniko-tekhnologicheskie resheniya, R01.2020.000.02.TEO, “METR” Ltd. Moscow, 2020 g.
2. Ivanov, A.B. Aktualizatsiya metodov otsenki riskov pri transportirovani zhidkikh radioaktivnykh otkhodov s uchetom noveyshikh tekhnologiy upakovyvaniya / A.B. Ivanov, S.V. Petrov // Atomnaya energiya. – 2022. – Vol. 132, No. 5. – P. 305–312.
3. Smirnov, P.I. Razrabotka i primeneniye novykh materialov dlya transportnykh upakovochnykh komplektov dlya vysokoaktivnykh zhidkikh radioaktivnykh otkhodov / P.I. Smirnov, M.V. Orlov // Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti. – 2023.
4. Pravila transportirovki yadernykh materialov, radioaktivnykh veshchestv i radioaktivnykh otkhodov ot 28 maya 2021 goda №183.
5. Protokol otbora prob ZhRO iz mest khraneniya v kolichestve 15 shtuk, No. 02-09-01/1 ot 30.12.2024 g.
6. Briesmeister, J.F. MCNP - a general Monte-Carlo Code for neutron and photon Transport / J.F. Briesmeister [et al.] – Los Alamos. – 1997. – LA-7396M.
7. MCNP: Neutron Benchmark / Problems Daniel J., Whalen David A., Cardon Jennifer L., Uhle John S., Hendricks.- LA-12212, DE92 004710. – November 1991. – 87 p.
8. Gigienicheskie normativy. Sanitarно-epidemiologicheskie trebovaniya k obespecheniyu radiatsionnoy bezopasnosti, utverzhdenye prikazom Ministra natsional'noy ekonomiki Respubliki Kazakhstan No. 155 ot 27.02.2015.

СҰЙЫҚ РАДИОАКТИВТІ ҚАЛДЫҚТАРДЫ ТАСЫМАЛДАУ ҚАУІПСІЗДІГІНІҢ НЕГІЗДЕМЕСІ

Д. И. Абұлғазина*, А. К. Мухамедиев, М. К. Сейсенбаева, В. А. Поспелов,
В. В. Яковлев, Ю. Ю. Бакланова, А. Г. Коровиков

ҚР ҰАО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

** Байланыс үшін E-mail: davydenko@nnc.kz*

Мақалада Ақтау қаласының «МАЭК» ЖШС-дан Курчатов қаласының «Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы» РМК-ға сұйық радиоактивті қалдықтардың (СРҚ) сынамаларын тасымалдау қауіпсіздігін негіздеу жұмыстарының нәтижелері көрсетілген. Жұмыстың бастапқы кезеңінде СРҚ қасиеттері (белсенділігі, нуклидтік құрамы) туралы шығыс деректер негізінде сынамаларды тасымалдау үшін Қазақстан Республикасының атом энергиясын пайдалану саласындағы нормативтік құжаттарының талаптарына сай келетін арнайы көліктік-қаптама комплектісі (КҚК) жобаланып, дайындалды. Қауіпсіздікті негіздеу үшін КҚК бетіндегі гамма-сәулеленудің тиімді дозасының қуатын бағалау үшін нейтрондық-физикалық есептеулер жүргізілді және СРҚ сынамаларын тасымалдау қауіпсіздігі расталды.

Түйін сөздер: БН-350 РҚ, радиоактивті қалдықтар, тасымалдау, босатылған қаптама, көліктік-қаптама комплектісі, қауіпсіздік.

JUSTIFICATION OF THE SAFETY OF TRANSPORTING LIQUID RADIOACTIVE WASTE

D. I. Abulgazina*, A. K. Mukhamediyev, M. K. Seisenbayeva, V. A. Pospelov,
V. V. Yakovlev, Yu. Yu. Baklanova, A. G. Korovikov

Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

** E-mail for contacts: davydenko@nnc.kz*

This paper presents the results of the work carried out to justify the safe transport of liquid radioactive waste (LRW) samples from MAEK LLP in Aktau to the RSE "National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan" in Kurchatov. Initially, a special transport and packaging kit (TUK) was designed and manufactured for the samples, based on preliminary data on the properties of the LRW (activity and nuclide composition). The TUK meets the requirements of Kazakhstan's regulatory documents on the use of atomic energy. Neutronic calculations were performed to evaluate the effective dose rate of gamma radiation on the surface of the TUK, thereby confirming the safety of transporting LRW samples.

Keywords: BN-350 RF, radioactive waste, transportation, excepted packaging, transport packaging kit, safety.