

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-2-104-111>
УДК 621.6; 629.039.58

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА АКТИВНОСТИ ЖРО РЕАКТОРА БН-350, ОТВЕРЖДЕННЫХ СОРБЕНТАМИ

В. В. Бакланов, И. В. Прозорова*, А. К. Мухамедиев, А. А. Прозоров, Ю. Ю. Бакланова, О. С. Букина

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

Оценка уровня активности радиоактивных отходов, находящихся в емкостях хранилища реакторной установки БН-350, необходима для количественной характеристики радиационных параметров отходов и оценки условий безопасного хранения и дальнейшего обращения. Данные по активности и радионуклидному составу позволяют оценить уровень радиационного воздействия, а также рассмотреть, как различные способы перевода жидких радиоактивных отходов в нетекучее состояние влияют на их радиационные характеристики. В работе приведена оценка удельной активности жидких радиоактивных отходов, переведенных в нетекучее состояние с использованием сорбентов, по γ -излучению на прогнозные периоды (2025 г, 2050 г и 2075 гг). В качестве сорбентов рассмотрены перлит, агровермикулит и суперабсорбент. Показано влияние сорбента на радиационные характеристики получаемых отходов. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологий перевода жидких радиоактивных отходов в нетекучее состояние и оценке условий обращения с ними.

Ключевые слова: жидкие радиоактивные отходы (ЖРО), удельная активность, иммобилизация, сорбенты, реактор БН-350

1. ВВЕДЕНИЕ

Реакторная установка (РУ) БН-350, введенная в эксплуатацию в 1973 году, не оснащена технологическими комплексами для полной переработки радиоактивных отходов (РАО). В проектах реакторных установок первого поколения требования к выводу из эксплуатации и созданию соответствующей инфраструктуры по обращению с РАО не предусматривались нормативными документами.

В Республике Казахстан с 1999 года реализуется проект по выводу из эксплуатации РУ БН-350, в рамках которого предусмотрено обращение с РАО и решение задач, связанных с радиоактивными отходами. Вопросы обращения с отходами и перспективы формирования твердых форм РАО в рамках вывода из эксплуатации подробно рассмотрены в работе [1]. Исследования радионуклидного состава и радиационных характеристик жидких радиоактивных отходов (ЖРО) проведены ранее [2].

В настоящее время в Национальном ядерном центре Республики Казахстан ведутся работы по изучению возможности перевода жидких радиоактивных отходов (ЖРО) в нетекучее состояние. Хранение ЖРО в соответствии с действующим законодательством Республики Казахстан рассматривается как временная мера. Для обеспечения долговременного безопасного хранения и последующего захоронения ЖРО необходимо перевести их в нетекучее состояние, удобное для дальнейшего обращения.

В данной статье рассматривается расчетная оценка активности при переводе ЖРО, накопленных на РУ БН-350 в процессе эксплуатации, в нетекучее состояние, методом сорбции с использованием агроверми-

кулита, перлита порошкового М-100 и полимерного суперабсорбента. Такой перевод отходов в нетекучее состояние (иммобилизация) является одним из ключевых этапов их подготовки к длительному хранению или захоронению. Основная цель иммобилизации – обеспечить минимальную подвижность радионуклидов и стабильные физико-химические характеристики конечного продукта.

Традиционно для иммобилизации применяются цементные, геополимерные, стекло- и керамические матрицы. Однако для отходов низкой и средней активности, особенно при больших объемах, более целесообразно использовать сорбционно-пористые материалы (минералы и полимеры), которые могут повышать удержание радионуклидов, а также влияют на пористость и газопроницаемость матрицы.

В качестве сорбционных материалов для перевода ЖРО в нетекучее состояние рассматривается широкий круг материалов. В данной работе в качестве модельных сорбентов выбран перлит, агровермикулит и полимерный суперабсорбент. Их выбор обусловлен высокой пористостью, способностью удерживать жидкие растворы, химической стабильностью, а также возможностью связывания радионуклидов (в первую очередь Cs и Sr) за счет сорбционных и ионообменных процессов.

Эффективность применения подобных материалов подтверждается результатами ранее проведенных исследований. Так, в работе [3] рассмотрено удаление Cs, Sr, Eu, Am и Tc из имитируемых растворов ЖРО с использованием вермикулита. Показано, что извлечение Cs и Sr достигает порядка 95%, Am – око-

до 90%, Eu – до 80%. Там же отмечена возможность удаления радионуклида Tc-99 из водных растворов. Авторами установлено, что вермикулит сохраняет устойчивость при радиационном воздействии и может применяться не только как сорбент, но и как элемент инженерных барьеров при обращении с низкоактивными отходами.

В обзоре [4] рассмотрены глинистые минералы как адсорбенты тяжелых металлов и радионуклидов из водных растворов. Приведена классификация, проанализирована структура минералов, их поверхностные свойства и механизмы сорбции (комплексобразование и ионообмен). Отмечено, что не все из рассмотренных материалов могут быть применены к ЖРО, однако описанные методы и принципы их исследования могут быть использованы для решения задач иммобилизации ЖРО. В статье сделано заключение о том, что свойства глинистых минералов (включая перлит и вермикулит) активно исследуются как эффективные адсорбенты радионуклидов.

В тематическом специальном выпуске [5] рассмотрены различные материалы для иммобилизации, включая минеральные, композитные и гибридные матрицы. Представлен обзор современных направлений развития этой области. Отмечается, что сочетание пористых минералов с другими матричными системами (цементы, геополимеры) является перспективным, и перлит или вермикулит могут использоваться в таких смесях в качестве наполнителей или адсорбентов.

Суперабсорбенты (SAP) представляют собой полимерные гели, способные удерживать значительные объемы воды и растворов. В обзоре [6] рассмотрены их химическая природа, структура, методы синтеза и основные характеристики (емкость впитывания, скорость набухания, устойчивость ионных сред и влияние солей). По данным авторов SAP способны удерживать огромные объемы жидкости за счет гелевой структуры, что делает их потенциально применимыми для связывания ЖРО.

При этом использование SAP для радиоактивных отходов вносит ряд ограничений. К ним относятся контроль удержания радионуклидов, устойчивость к радиации, изменение объема при набухании и возможное выделение жидкости под нагрузкой. В работе [7] рассмотрены подходы к модификации SAP, направленные на улучшение их свойств и повышение радиационной стойкости.

Требования к сорбентам/абсорбентам для радиоактивных сред рассмотрены в работе [8]. Обобщены требования к материалам для низкоактивных смесей (высокая поглощающая способность, химическая и физическая устойчивость, стабильность формы при радиационном воздействии и т.д.) и перечень рекомендуемых испытаний для конечной формы отходов (выщелачивание и химическая устойчивость). В заключение авторами сделан вывод о необходимости

соответствия требованиям по долговечности, удержанию радионуклидов и радиационной стойкости любых сорбентов, используемых с ЖРО, включая SAP.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что сорбционно-пористые материалы обладают значительным потенциалом при обращении с ЖРО. Выбор конкретного материала и оценка его влияния на радиационные характеристики требуют дополнительного анализа с учетом состава ЖРО и условий их дальнейшего хранения.

В этой связи актуальной задачей является оценка влияния типа сорбента на радиационные характеристики ЖРО при их переводе в нетекучее состояние.

Несмотря на наличие работ, посвященных сорбционным свойствам данных материалов, их применение в задачах формирования конечных форм радиоактивных отходов требует дополнительного обоснования, в том числе с точки зрения радиационных характеристик получаемых композиций.

В рамках работы были использованы данные по составу и активности ЖРО, накопленных на РУ БН-350 [2]. Для оценки влияния сорбционных материалов рассмотрены варианты перевода ЖРО в нетекучее состояние с использованием перлита, агровермикулита и полимерного суперабсорбента. Они обладают высокой удельной поверхностью, способностью к удержанию влаги и сорбции радионуклидов, что позволяет рассматривать их не только как вспомогательные компоненты, но и как функциональную основу для иммобилизации ЖРО. Проведена подготовка расчетных моделей образцов (ЖРО без сорбента и с добавлением сорбентов), выполнены расчеты удельной активности по γ -излучению на прогнозные периоды (2025, 2050 и 2075 гг.), а также проанализированы изменения радионуклидного состава.

Целью настоящей работы является оценка радиационных характеристик ЖРО, переведенных в нетекучее состояние с использованием сорбентов. Полученные результаты могут быть использованы при обосновании выбора сорбционных материалов и разработке технологий обращения с ЖРО на объектах вывода из эксплуатации.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1. Объект исследования

Объектом исследования являлись ЖРО РУ БН-350, которые представляют собой высокосолевыми растворы, и в меньшем количестве присутствуют пульпы ионообменных материалов и органические отходы (отработанные масла).

В работе использованы ранее полученные данные по физико-химическим свойствам и радиоизотопному составу ЖРО РУ БН-350 [2]. Согласно этим данным, отходы характеризуются щелочной реакцией среды ($\text{pH} \geq 12$) и высоким содержанием растворенных солей. Установлено, что основным радионуклидом,

определяющим радиационные характеристики ЖРО, является ^{137}Cs .

2.2. Сорбционные материалы

Для перевода ЖРО в нетекучее состояние в рамках данной работы использовали три типа сорбционных материалов: перлит порошок М-100, агровермикулит и полимерный суперабсорбент.

Перлит М-100 характеризуется преобладанием частиц размером 0,1-0,8 мм (около 80%) и плотностью 1,14 г/см³. Агровермикулит представлен преимущественно частицами размером 0,4-4 мм (95%) при плотности 1,29 г/см³. Полимерный суперабсорбент имеет размер частиц в диапазоне от 0,2 до 1,5 мм (около 89%) и плотность 1,71 г/см³.

2.3. Подготовка расчетных моделей

Для оценки влияния сорбционных материалов на радиационные характеристики ЖРО были рассмотрены варианты перевода отходов в нетекучее состояние с использованием следующих сорбционных материалов:

- перлит порошок М-100 (характеризуется преобладанием частиц размером 0,1-0,8 мм (около 80%) и плотностью 1,14 г/см³);
- агровермикулит (представлен преимущественно частицами размером 0,4-4 мм (95%) при плотности 1,29 г/см³);
- полимерный суперабсорбент (имеет размер частиц в диапазоне от 0,2 до 1,5 мм (около 89%) и плотностью 1,71 г/см³).

В рамках работы сформированы расчетные модели образцов, включающие:

- ЖРО в исходном состоянии (без добавления сорбентов);
- ЖРО с сорбционными материалами.

2.4. Условия моделирования

Перевод ЖРО в нетекучее состояние моделировался с учетом заданных соотношений сорбент/ЖРО. Рассмотренные объемные соотношения для перлита и

агровермикулита составляли 2:1, для суперабсорбента 1:1 [9].

Соотношения сорбент/ЖРО выбирались исходя из их сорбционной емкости и способности обеспечивать перевод ЖРО в нетекучее состояние. Для перлита и агровермикулита использовано объемное соотношение 2:1, обеспечивающее полное поглощение жидкой фазы с сохранением сыпучей структуры материала.

Для полимерного суперабсорбента применено соотношение 1:1, что связано с его высокой водоудерживающей способностью и способностью к набуханию, позволяющей эффективно связывать жидкую фазу при меньшем объеме сорбента.

Выбранные соотношения также соответствуют условиям формирования стабильной нетекучей формы, пригодной для дальнейшего обращения. Основные характеристики приведены в таблице 1.

2.5. Расчетные подходы

На основе исходных данных выполнены расчеты удельной активности ЖРО по γ -излучению на прогнозные периоды (2025, 2050 и 2075 гг.). Расчеты выполнялись с использованием закона радиоактивного распада с учетом периода полураспада соответствующих радионуклидов.

В расчетах учитывались радионуклиды ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{54}Mn и ^{59}Fe . При этом экспериментальные данные по радионуклидам ^{60}Co , ^{54}Mn и ^{59}Fe в рамках настоящей работы отсутствуют. Указанные радионуклиды были включены в расчетную модель как типичные γ -излучающие продукты активации и деления с целью оценки их вклада в суммарную активность на прогнозные периоды.

Дополнительно проведен анализ изменения концентраций долгоживущих радионуклидов, а также оценено влияние типа сорбента на радиационные характеристики отходов.

2.6. Радиационные расчеты и измерения

Радиационные расчеты выполнены с использованием многоцелевой программы MCNP6 с примени-

Таблица 1. Данные по сорбентам, выбранным для отверждения ЖРО

Параметр	Агровермикулит	Перлит порошок М-100	Суперабсорбент
Масса сухого сорбента, г	3,3	1,6	11,8
Объем сухого сорбента, мл	20	20	15
Масса ЖРО, г	11,1	11,1	16,7
Объем ЖРО, мл	10	10	15
Масса продукта смешения сразу после смешивания	14,4	12,7	28,5
Потеря массы через 24 ч, %	0,11	0,08	0,12
Объем продукта смешения, мл	23	25	31
Объем непрореагировавшего сорбента, %	50	63	53
Коэффициент увеличения объема ЖРО, отн. ед.	2,30	2,50	2,07
Коэффициент увеличения массы ЖРО, отн. ед.	1,29	1,14	1,71
Удельный объем, мл/г	1,60	1,97	1,09
Удельный объем, м ³ /кг	0,0016	0,0020	0,0011

ем библиотек констант ENDF/B5 и ENDF/B6 [10,11]. Перевод флюенса фотонного излучения в эффективную дозу осуществлялся с помощью коэффициентов, описанных в [12].

Для расчетов была сформирована трехмерная модель контейнера с ЖРО для MCNP6, учитывающая его конструкцию, материалы и характеристики содержимого, что позволило оценить распределение излучения.

Для оценки удельной активности ЖРО, переведенных в нетекучее состояние, проведены измерения активности ^{137}Cs в образцах сорбентов, пропитанных ЖРО. Интенсивность излучения и активность сорбентов, пропитанных ЖРО, определялась с помощью сцинтилляционного детектора со спектрометром Canberra. Активность Cs-137 в сорбенте определялась по формуле:

$$A_{RS} = k_v \cdot \frac{S}{t_L \eta \epsilon}$$

где индекс rs относится к сорбенту;

S – площадь ППП (пик полного поглощения) с энергией 662 кэВ, имп.;

t_L – время измерения, $t_L = 100$ с;

η – выход гамма-квантов, $\eta = 0,85$;

ϵ – эффективность регистрации для точечного источника, $\epsilon = 2,07 \cdot 10^{-3}$;

k_v – поправочный коэффициент, учитывающий различие условий регистрации для точечного и объемного поглощающего источника.

Предел допускаемой погрешности результатов определения активности Cs-137 в сорбентах составил 7 %.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Радионуклидный состав и удельная активность

Расчеты радиационных характеристик выполнены для радионуклидов ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{54}Mn и ^{59}Fe [9,13].

Результаты расчетов удельной активности и концентраций радионуклидов для ЖРО в исходном состоянии и ЖРО, переведенных в нетекучее состояние с использованием сорбентов типа перлит, агровермикулит и суперабсорбент, приведены в таблице 2.

В таблице в графе 2 представлены экспериментально определенные значения удельной активности ^{137}Cs для образцов ЖРО, переведенных в нетекучее состояние с помощью сорбентов (агровермикулит, перлит и суперабсорбент). Данные соответствуют из-

Таблица 2. Радиационные характеристики ЖРО и ЖРО, отвержденных сорбентами

Нуклид	Удельная активность ЖРО, Бк/кг	Удельная активность, Бк/кг			Концентрация радионуклидов, г/кг		
	на октябрь 2023 г. – январь 2024 г.	на 1 янв. 2025 г.	на 1 янв. 2050 г.	на 1 янв. 2075 г.	на 1 янв. 2025 г.	на 1 янв. 2050 г.	на 1 янв. 2075 г.
1	2	3	4	5	6	7	8
ЖРО							
^{137}Cs	$1,1 \cdot 10^8 \pm 0,2 \cdot 10^8 [2]$	$1,07 \cdot 10^{08}$	$6,01 \cdot 10^{07}$	$3,38 \cdot 10^{07}$	$3,33 \cdot 10^{05}$	$1,87 \cdot 10^{05}$	$1,05 \cdot 10^{05}$
^{60}Co	$1,51 \cdot 10^{08}$	$1,28 \cdot 10^{08}$	$4,79 \cdot 10^{06}$	$1,79 \cdot 10^{05}$	$3,06 \cdot 10^{06}$	$1,14 \cdot 10^{07}$	$4,27 \cdot 10^{09}$
^{54}Mn	$5,50 \cdot 10^{06}$	$1,99 \cdot 10^{06}$	$3,09 \cdot 10^{03}$		$6,93 \cdot 10^{09}$	$1,08 \cdot 10^{17}$	
^{59}Fe	$5,50 \cdot 10^{06}$	$4,38 \cdot 10^{03}$			$2,38 \cdot 10^{12}$		
Итого	$2,72 \cdot 10^{08}$	$2,37 \cdot 10^{08}$	$6,49 \cdot 10^{07}$	$3,39 \cdot 10^{07}$			
ЖРО + агровермикулит							
^{137}Cs	$8,53 \cdot 10^{07}$	$8,28 \cdot 10^{07}$	$4,66 \cdot 10^{07}$	$2,62 \cdot 10^{07}$	$2,58 \cdot 10^{05}$	$1,45 \cdot 10^{05}$	$8,15 \cdot 10^{06}$
^{60}Co	$1,17 \cdot 10^{08}$	$9,94 \cdot 10^{07}$	$3,71 \cdot 10^{06}$	$1,39 \cdot 10^{05}$	$2,37 \cdot 10^{06}$	$8,86 \cdot 10^{08}$	$3,31 \cdot 10^{09}$
^{54}Mn	$4,26 \cdot 10^{06}$	$1,54 \cdot 10^{06}$	$2,40 \cdot 10^{03}$		$5,37 \cdot 10^{09}$	$8,35 \cdot 10^{18}$	
^{59}Fe	$4,26 \cdot 10^{06}$	$3,40 \cdot 10^{03}$			$1,84 \cdot 10^{12}$		
Итого	$2,11 \cdot 10^{08}$	$1,84 \cdot 10^{08}$	$5,03 \cdot 10^{07}$	$2,63 \cdot 10^{07}$			
ЖРО + перлит порошковый М-100							
^{137}Cs	$9,65 \cdot 10^{07}$	$9,37 \cdot 10^{07}$	$5,27 \cdot 10^{07}$	$2,96 \cdot 10^{07}$	$2,92 \cdot 10^{05}$	$1,64 \cdot 10^{05}$	$9,22 \cdot 10^{06}$
^{60}Co	$1,33 \cdot 10^{08}$	$1,13 \cdot 10^{08}$	$4,20 \cdot 10^{06}$	$1,57 \cdot 10^{05}$	$2,69 \cdot 10^{06}$	$1,00 \cdot 10^{07}$	$3,74 \cdot 10^{09}$
^{54}Mn	$4,82 \cdot 10^{06}$	$1,74 \cdot 10^{06}$	$2,71 \cdot 10^{03}$		$6,08 \cdot 10^{09}$	$9,44 \cdot 10^{18}$	
^{59}Fe	$4,82 \cdot 10^{06}$	$3,84 \cdot 10^{03}$			$2,09 \cdot 10^{12}$		
Итого	$2,39 \cdot 10^{08}$	$2,08 \cdot 10^{08}$	$5,69 \cdot 10^{07}$	$2,98 \cdot 10^{07}$			
ЖРО + суперабсорбент							
^{137}Cs	$6,43 \cdot 10^{07}$	$6,25 \cdot 10^{07}$	$3,51 \cdot 10^{07}$	$1,97 \cdot 10^{07}$	$1,95 \cdot 10^{05}$	$1,09 \cdot 10^{05}$	$6,15 \cdot 10^{06}$
^{60}Co	$8,85 \cdot 10^{07}$	$7,50 \cdot 10^{07}$	$2,80 \cdot 10^{06}$	$1,04 \cdot 10^{05}$	$1,79 \cdot 10^{06}$	$6,68 \cdot 10^{08}$	$2,50 \cdot 10^{09}$
^{54}Mn	$3,22 \cdot 10^{06}$	$1,16 \cdot 10^{06}$	$1,81 \cdot 10^{03}$		$4,05 \cdot 10^{09}$	$6,30 \cdot 10^{18}$	
^{59}Fe	$3,22 \cdot 10^{06}$	$2,56 \cdot 10^{03}$			$1,39 \cdot 10^{12}$		
Итого	$1,59 \cdot 10^{08}$	$1,39 \cdot 10^{08}$	$3,79 \cdot 10^{07}$	$1,99 \cdot 10^{07}$			

мерениям на октябрь 2023 – января 2024 г. экспериментальные данные представлены для сопоставления с расчетными.

Установлено, что значения удельной активности изменяются в зависимости от типа используемого сорбента. При этом наибольший вклад в суммарную активность во всех случаях вносит ^{137}Cs .

Значения удельной активности, полученные по результатам измерений, ниже расчетных значений на 2025 г.

3.2. Изменение активности во времени

Расчеты показали, что доля ^{137}Cs в суммарной активности составляет около 42,5% на начальный момент, увеличивается до 92,6% к 2050 г. и достигает 99,5% к 2075 г. Вклад короткоживущих радионуклидов (^{54}Mn и ^{59}Fe) быстро уменьшается и становится незначительным.

На рисунке 1 представлена динамика изменения удельной активности радионуклидов во времени, рассчитанная для ЖРО из емкости Б-02/05 (нижний уровень), характеризующейся максимальным значением активности.

3.3. Активность контейнера с ЖРО

Для оценки практических условий обращения с ЖРО, переведенными в нетекучее состояние, выполнен расчет суммарной активности контейнера типа

НЗК-150-1,5П при его заполнении различными композициями «ЖРО + сорбент».

Результаты оценки активности контейнера типа НЗК-150-1,5П при заполнении смесью ЖРО с сорбентами приведены в таблице 3.

Таблица 3. Величины активности контейнера НЗК-150-1,5П

Используемый сорбент	Масса m (сорбент), кг	Масса m (ЖРО), кг	Общая масса (сорбент + ЖРО), кг	Активность, Бк
Агровермикулит	212,0	722,6	934,6	$1,83 \cdot 10^{11}$
Перлит порошковый	101,7	720,7	822,4	$1,82 \cdot 10^{11}$
Суперсорбент	572,4	804,7	1377,1	$2,03 \cdot 10^{11}$

Полученные значения активности используются для оценки дозовой нагрузки и обоснования условий безопасного хранения и транспортировки отходов. Значения суммарной активности контейнера составляют порядка (от 1,8 до $2,0$) $\cdot 10^{11}$ Бк в зависимости от используемого сорбента.

3.4. Дозовая нагрузка

На основе полученных значений активности контейнера выполнена оценка мощности эквивалентной дозы (МЭД) от контейнера с ЖРО и сорбентом.

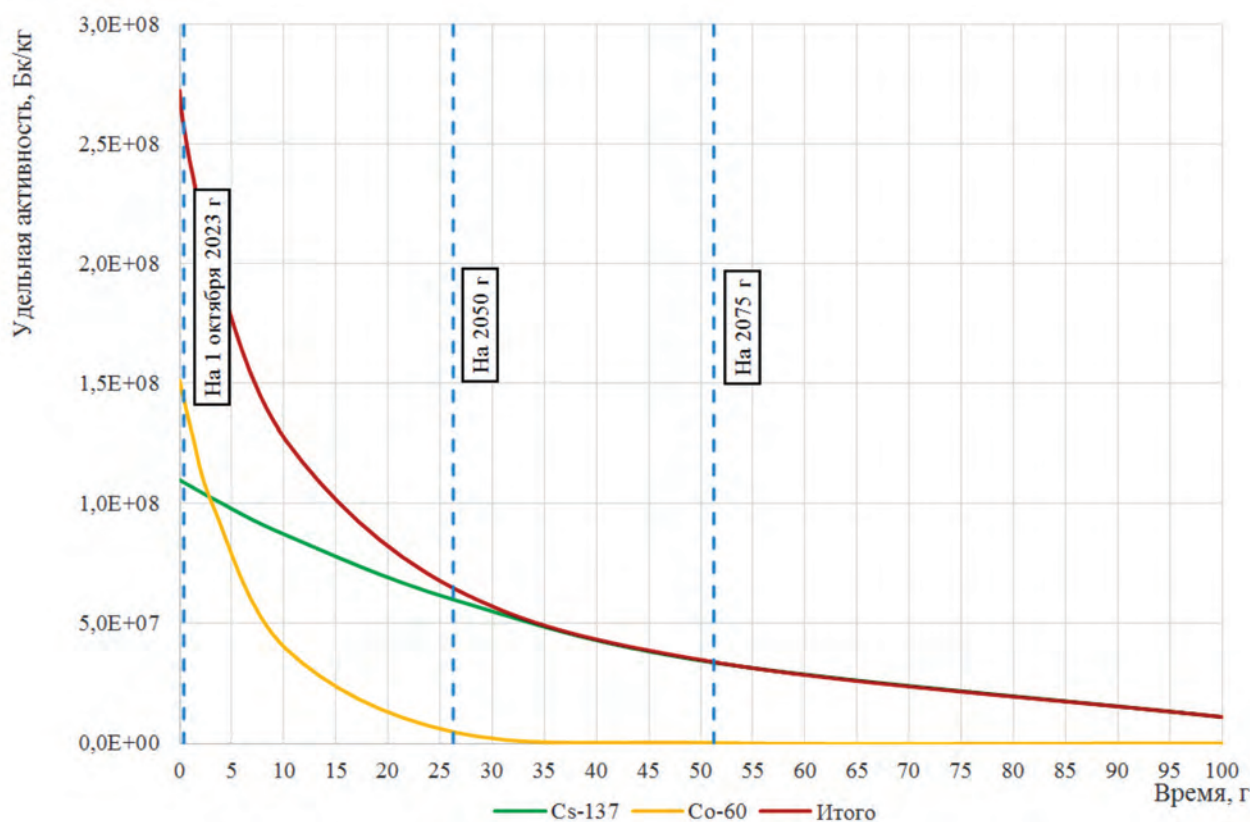


Рисунок 1. Изменение удельной активности радионуклидов во времени (на примере ЖРО из емкости Б-02/05, нижний уровень) на основе расчетных данных.

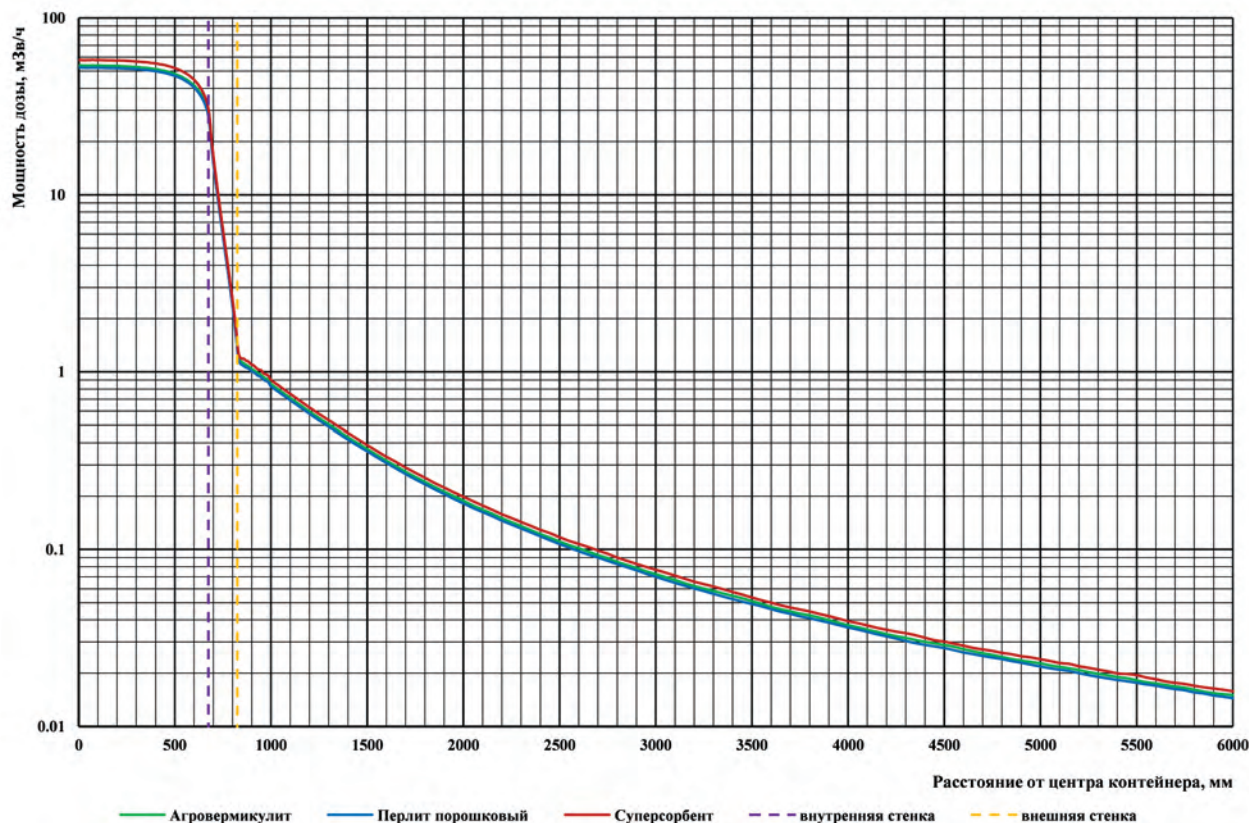


Рисунок 2. Зависимость мощности эквивалентной дозы от расстояния для контейнера НЗК-150-1,5П с ЖРО и сорбентом

Расчетное значение МЭД на поверхности контейнера составляет около 1,15 мЗв/ч, на расстоянии 1 м – около 0,26 мЗв/ч. При увеличении расстояния наблюдается снижение МЭД. Полученные значения МЭД характеризуют уровень радиационного воздействия при хранении и обращении с контейнером. Зависимость МЭД от расстояния представлена на рисунке 2.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты позволяют оценить влияние сорбционных материалов на радиационные характеристики ЖРО при их переводе в нетекучее состояние.

Показано, что выбор исходных данных существенно влияет на расчетные значения удельной активности. В работе использован консервативный подход, основанный на максимальных значениях активности ЖРО, что приводит к некоторому завышению расчетных величин по сравнению с экспериментальными данными.

Различия между расчетными и экспериментально определенными значениями удельной активности обусловлены увеличением массы системы при введении сорбентов, что приводит к эффекту разбавления, а также влиянием геометрических факторов и особенностей регистрации γ -излучения при измерениях. Таким образом, работа направлена не только на оценку

эффекта разбавления, но и на анализ радиационных параметров конечной формы отходов в условиях их практического размещения.

На основе анализа изменений радионуклидного состава во времени установлено, что вклад короткоживущих радионуклидов (^{54}Mn и ^{59}Fe) быстро уменьшается и становится пренебрежимо малым. Основной вклад в суммарную активность на всех рассматриваемых временных этапах вносит ^{137}Cs . Доля ^{137}Cs возрастает с течением времени и достигает более 90 % к 2050 г. и более 99% к 2075 г.

Установлено, что различия в значениях удельной активности для различных сорбентов обусловлены их физико-химическими характеристиками, прежде всего плотностью и способностью удерживать ЖРО (сорбционной емкостью). При этом суммарная активность системы (сорбент+ЖРО) в целом определяется исходной активностью ЖРО и слабо зависит от типа используемого сорбента.

Сравнительный анализ свойств сорбционных материалов показал, что суперсорбент обеспечивает высокую степень удержания жидкости, однако приводит к образованию гелеобразной структуры, что может осложнять дальнейшее обращение с отходами. Перлит и агровермикулит, напротив, сохраняют стабильную твердую форму, что делает их более технологичными при транспортировке и размещении. С

учетом полученных результатов перлит и агровермикулит представляются более предпочтительными с точки зрения технологичности и формирования стабильной твердой формы отходов.

Оценка заполнения контейнера типа НЗК-150-1,5П показала, что значения суммарной активности находятся в близком диапазоне для различных сорбентов и составляют порядка 10^{11} Бк. Это подтверждает, что выбор сорбента оказывает ограниченное влияние на общий уровень активности, но существенно влияет на физическую форму отходов.

Расчеты дозовой нагрузки показали, что мощность эквивалентной дозы на поверхности контейнера составляет около $1,15 \text{ мЗв/ч}$, а на расстоянии 1 м около $0,26 \text{ мЗв/ч}$. Полученные значения могут быть использованы при оценке условий безопасного обращения с отходами и планировании работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе произведена оценка радиационных характеристик ЖРО РУ БН-350 при их переводе в нетекучее состояние с использованием сорбционных материалов (перлит, агровермикулит, полимерный суперсорбент). Проведенные расчеты показали, что удельная активность ЖРО снижается со временем вследствие радиоактивного распада, при этом основной вклад в суммарную активность вносит радионуклид ^{137}Cs .

Установлено, что введение сорбентов приводит к изменению удельной активности за счет увеличения массы системы, однако выбор сорбента оказывает ограниченное влияние на суммарную активность отходов.

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показало, что экспериментально определенные значения удельной активности ниже расчетных, что обусловлено использованием консервативного подхода при расчетах, а также влиянием факторов разбавления и особенностей измерений.

Оценка активностей контейнера типа НЗК-150-1,5П показала, что значения суммарной активности находятся в диапазоне порядка 10^{11} Бк. По результатам расчета мощности эквивалентной дозы установлено, что на поверхности значения около $1,15 \text{ мЗв/ч}$, на расстоянии 1 м – $0,26 \text{ мЗв/ч}$.

Полученные значения могут быть использованы при обосновании условий безопасного обращения с отходами.

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. Mukhamedov N., Baklanov V., Moldagulov M., Toleubekov K., Surayev A., Yagudin A., Kanatnikov S. The BN-350 Reactor Decommissioning: Quantitative Analysis and Prospects for Solid Radioactive Waste Management. *Energies*. 2025. Vol. 18, No. 17, 4651. <https://doi.org/10.3390/en18174651>.
2. Samarkhanov K., Baklanov V., Koyanbayev Y., Baklanova Y., Bukina O., Popov Y., Sabitova R. Radiological characterization and dosimetric assessment of liquid radioactive waste from the BN-350 reactor. In *Proceedings of the XXV International Symposium on Solid State Dosimetry (ISSSD 2025)*, Belo Horizonte, Brazil, 22–26 September 2025; Book of Proceedings, Volume 4, pp. 72–80.
3. Fuks L., Herdzik-Koniecko I. Vermiculite as a potential component of the engineered barriers in low- and medium-level radioactive waste repositories // *Applied Clay Science*. – 2018. – Vol. 161. – P. 139–150. – DOI: 10.1016/j.clay.2018.04.010.
4. Xie S., Huang L., Su C., Yan J., Chen Z., Li M., Du M., Zhang H. Application of clay minerals as adsorbents for removing heavy metals from the environment // *Green and Smart Mining Engineering*. – 2024. – Vol. 1, No. 3. – P. 249–261. – DOI: 10.1016/j.gsm.2024.07.002.
5. Hyatt N.C., Ojovan M.I. Special Issue: Materials for Nuclear Waste Immobilization // *Materials (Basel)*. – 2019. – Vol. 12, No. 21. – Art. 3611. – DOI: 10.3390/ma12213611.
6. Zohuriaan-Mehr M.J., Kabiri K. Superabsorbent polymer materials: A review // *Iranian Polymer Journal*. – 2008. – Vol. 17, No. 6. – P. 451–477.
7. Yang Y., Liang Z., Zhang R., Zhou S., Yang H., Chen Y., Zhang J., Yin H., Yu D. Research advances in superabsorbent polymers // *Polymers*. – 2024. – Vol. 16. – Art. 501. – DOI: 10.3390/polym16040501.
8. Milyutin V.V., Nekrasova N.A., Kaptakov V.O. Modern sorption materials for cesium and strontium radionuclide extraction from liquid radioactive waste // *Radioactive Waste*. – 2020. – No. 4 (13). – P. 80–89. – DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-80-89.
9. Ноқанова Ә.Д., Букина О.С., Бакланова Ю.Ю., Коянбаев Е.Т., Бакланов В.В. Определение сорбционных характеристик для перевода ЖРО в нетекучее состояние // *Вестник НЯЦ РК*. – 2026. – № 1. – С. 36–42.
10. Briesmeister J.F. MCNP – A General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport. – Los Alamos, 1997. – LA-7396-M.
11. Chadwick M.B. et al. ENDF/B-VI nuclear data for science and technology: cross sections, covariances, fission product yields and decay data // *Nuclear Data Sheets*. – 2006. – Vol. 107, No. 12. – P. 2931–3060.
12. Гигиенические нормативы. Санитарно-эпидемиологические требования к обеспечению радиационной безопасности: утв. приказом Министра национальной экономики Республики Казахстан № 155 от 27.02.2015.
13. Радиационные характеристики продуктов деления: справочник / Н.Г. Гусев и др. – М.: Атомиздат, 1974. – 224 с.

**СОРБЕНТТЕРМЕН ҚАТЫРЫЛҒАН БН-350 РЕАКТОРЫНЫҢ СРҚ БЕЛСЕНДІЛІГІН
БОЛЖАМДЫ БАҒАЛАУ**

В. В. Бакланов, И. В. Прозорова*, А. К. Мухамедиев, А. А. Прозоров, Ю. Ю. Бакланова, О. С. Букина

Атом энергиясы институтының филиалы, Курчатов, Қазақстан

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

БН-350 реакторлық қондырғысының сақтау орнының сыйымдылықтарындағы радиоактивті қалдықтардың (РАҚ) белсенділік деңгейін бағалау сақтау қауіпсіздігін қамтамасыз ету, сондай-ақ олармен жұмыс істеу үшін технологияларды таңдау үшін қажет. Бұл радиоактивті материалдарды дұрыс жіктеуді, қауіпсіз сақтауды және кейіннен жоюды қамтамасыз ететін радиациялық қауіпсіздік жүйесінің негізгі элементтерінің бірі. Зерттеу аясында 2025, 2050 және 2075 жылдарға арналған ү-сәулелену бойынша сорбенттермен қатырылған сұйық радиоактивті қалдықтардың (СРҚ) меншікті белсенділігін бағалау орындалды; сол кезеңдердегі негізгі және ұзақ өмір сүретін радионуклидтердің концентрациясы анықталды; РАҚ-тағы бөлінетін заттардың үлес салмағы есептелді. Зерттеу нысаны – перлит, агровермикулит және «суперабсорбент» сияқты сорбенттермен қатырылған СРҚ болады. Нәтижелер РАҚ-пен одан әрі жұмыс істеу кезінде сорбентті таңдау үшін пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: *сұйық радиоактивті қалдықтар (СРҚ), меншікті белсенділік, иммобилизация, БН-350 реакторы, сорбенттер.*

**ASSESSMENT OF THE ACTIVITY OF LIQUID RADIOACTIVE WASTE FROM THE BN-350
REACTOR SOLIDIFIED WITH SORBENTS**

V. V. Baklanov, I. V. Prozorova*, A. K. Mukhamediev, A. A. Prozorov, Yu. Yu. Baklanova, O. S. Bukina

*Institute of Atomic Energy Branch of the RSE "National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan,
Kurchatov, Kazakhstan*

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

Assessment of the activity of radioactive waste (RW) stored in the tanks of the BN-350 reactor facility is necessary to ensure safe storage and to support the selection of appropriate waste management technologies. This is one of the key elements of the radiation safety system, ensuring proper classification, safe storage, and subsequent disposal of radioactive materials. Within the framework of this study, the specific activity of liquid radioactive waste (LRW) immobilized using sorbents was evaluated based on gamma radiation for the years 2025, 2050, and 2075. The concentrations of the major long-lived radionuclides were determined for the same periods. The specific mass fraction of fissile materials in the radioactive waste was also calculated. The object of the study is liquid radioactive waste solidified using sorbents such as perlite, agrowermiculite, and superabsorbent. The results may be used to select appropriate sorbents for further radioactive waste management operations.

Keywords: *liquid radioactive waste (LRW), specific activity, immobilization, BN-350 reactor, sorbents*