DOI: 10.25283/2587-9707-2025-3-86-95 УДК 621.039.7

ВЛИЯНИЕ МОЩНОСТИ ОСТАТОЧНОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ ВАО НА ПЛОТНОСТЬ ЗАПОЛНЕНИЯ ПГЗРО

П. А. Блохин, С. А. Богатов, Д. Г. Григорук, А. В. Дёмин, Н. И. Дробышевский, К. С. Казаков, В. С. Кузнецов

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 23 июля 2025 г.

В статье приведены результаты расчетов возможного объема тепловыделяющих радиоактивных отходов, которые могут быть размещены в пункте глубинного захоронения для соблюдения условия непревышения температуры в 100 °С и 125 °С в материале бентонитового буфера. Расчеты выполнялись с применением разработанной в ИБРАЭ РАН и аттестованной в Ростехнадзоре программы для ЭВМ «Программа расчета теплового режима, напряженно-деформированного состояния и прочности пунктов захоронения радиоактивных отходов «FENIA 3D. Версия 1.0». Рассмотрены три варианта размещения упаковок остеклованных высокоактивных отходов с объемным тепловыделением матрицы 0,6; 1,0 и 2,0 кВт/м^3.

Ключевые слова: *радиоактивные отходы, ПГЗРО, инженерные барьеры безопасности, остаточное тепловыделение.*

Введение

Современная концепция обращения с высокоактивными радиоактивными отходами (ВАО) предполагает их размещение в пунктах глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) [1], создаваемых в устойчивых геологических формациях.

В Российской Федерации в качестве площадки строительства ПГЗРО рассматривается участок «Енисейский», расположенный в Нижнеканском массиве на территории Красноярского края.

ПГЗРО, имеющий проектные размеры порядка 300 × 750 м в плане и ограниченный глубинными отметками +5 и –70 м по Балтийской системе высот (БСВ), предполагается разместить в массиве кристаллических горных пород. Базовые технические решения (концепция захоронения) подразумевают расположение контейнеров с остеклованными ВАО в вертикальных 75-метровых скважинах, соединяющих выработки ПГЗРО, пройденные на двух горизонтах [2], что связано с применением технологии проходки скважин восстающего бурения «raise-boring» [3].

Безопасность захоронения в долгосрочном периоде обеспечивается мультибарьерной системой безопасности: «матрица РАО — бидон — пенал — контейнер для захоронения — буферные материалы — горная порода». В качестве буферных материалов предлагается использование бетонов и бентонитовых глин, которые также должны сдерживать выход радионуклидов за пределы области захоронения при нарушении целостности упаковки матрицы РАО.

Бентонитовые глины обладают свойством разбухать при гидратации и теряют эти свойства при 100—125 °С и выше [4], поэтому при

размещении упаковок с ВАО в ПГЗРО важно обеспечить непревышение предельной температуры материалов буферного экрана. Одним из факторов, влияющих на этот показатель для инженерных барьеров безопасности (ИББ), является мощность остаточного тепловыделения ВАО в момент их окончательной изоляции. Особое внимание уделяется РАО класса 1 (РАО-1), удельное остаточное тепловыделение упаковки которых при этом может достигать 2 кВт/м^3 [5].

Для проектных решений, предполагающих захоронение РАО-1 с тепловыделением 1 и 1,5 кВт/м^3, были проведены расчеты теплового режима, показавшие превышение температуры 100 °С в ПГЗРО за время жизненного цикла [6] и необходимость оптимизации существующего компоновочного решения. Базовая концепция захоронения и конфигурация подземной части ПГЗРО являются основой для вариантной проработки альтернативных схем размещения упаковок с РАО-1 [7]—[9]. На сегодняшний день рассматриваются три альтернативных способа захоронения («траншейная», «горизонтальная/камерная», «скважинная» — с тупиковыми скважинами). При выборе оптимального варианта, наряду с вопросом обеспечения безопасности и исключения рисков попадания радионуклидов в водоносные слои, важными аспектами также являются эффективность заполнения подземного хранилища и стоимость предлагаемого для реализации технического решения [7], [9].

В настоящей работе по трем концепциям захоронения проведены расчеты теплового режима ПГЗРО для РАО-1 с различными значениями мощности остаточного тепловыделения как накопленных, так и прогнозируемых к образованию. По результатам расчетов даны рекомендации по ограничению данного показателя для эффективного заполнения пространства ПГЗРО, и для каждой концепции рассчитан их возможный для захоронения объем.

Концепции захоронения РАО класса 1

Рассматриваемые концепции учитывают существующие проектные решения подземного комплекса, предполагающие создание на каждом горизонте 30 параллельных протяженных выработок/камер захоронения (КЗ). Расстояние между ними составляет 23 м. Размещение бидонов с остеклованными РАО-1 предполагается в металлических контейнерах диаметром ~0,7 м (невозвратного чехла — с толщиной стенки до 20 мм). Предварительная высота контейнеров с тремя бидонами составляет 3,36 м, с двумя — 2,5 м.

Траншейная концепция

В этой концепции ниже уровня пола КЗ оборудуются траншеи прямоугольного сечения, в которых упаковки с РАО-1 должны располагаться на расстоянии друг от друга по всей длине, которая составляет 288 м (рис. 1).

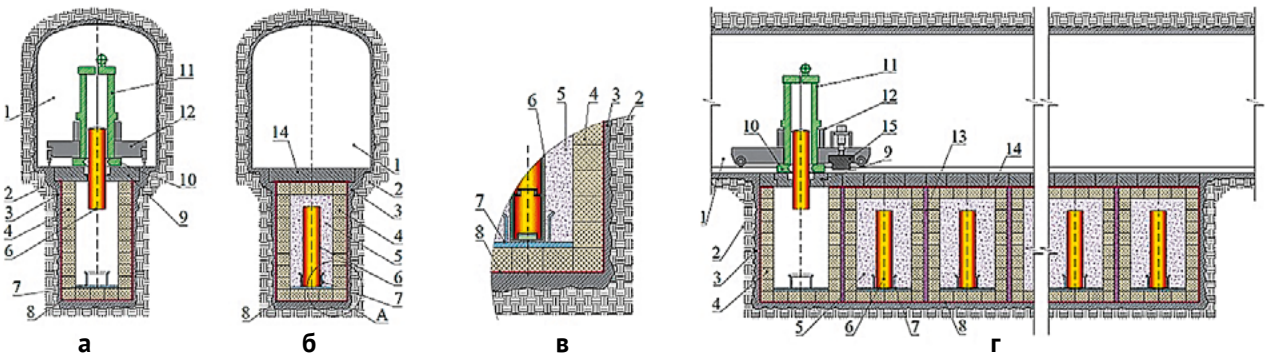

Рис. 1. Эскиз концепции захоронения РАО-1 в траншеях: а) поперечное сечение траншеи захоронения, вид в процессе загрузки контейнеров с РАО; б) поперечное сечение траншеи захоронения, вид после загрузки контейнеров с РАО и устройства ИББ; в) барьеры безопасности и конструктивные элементы системы захоронения; г) продольное сечение траншеи захоронения.

1 — камера захоронения; 2 — вмещающая горная порода; 3 — облицовка горной выработки (металлическая сетка, бетон-бентонитовая смесь); 4 — бентонитовый буферный экран (блоки прессованного бентонита); 5 — буферный заполнитель ячейки захоронения (алюминатный бетон или бентонитовые пелеты); 6 — контейнер с РАО-1 (в составе: невозвратный контейнер, бидон, стекломатрица РАО (алюмофосфатное стекло), инертный материал для заполнения пустот); 7 — опорная плита для позиционирования контейнера; 8 — облицовка из медного листа (принимается по результатам расчета миграции); 9 — плита биозащиты; 10 — шиберное устройство; 11 — транспортно-перегрузочный контейнер; 12 — платформа рельсовая электрическая для перемещения транспортно-перегрузочного контейнера; 13 — тепловой изолирующий барьер (принимается по результатам тепловых расчетов); 14 — бетонные несущие плиты покрытия траншеи захоронения; 15 — пробка защитная

Траншейная концепция позволяет до загрузки контейнеров с РАО-1 подготовить ее к их размещению (тампонировать возможные трещины в породе, обеспечить контролируемую укладку барьера из бентонитовых блоков). Ключевыми идеями траншейной концепции захоронения являются:

- возможность визуального и инструментального контроля качества сооружения бентонитового барьера (буфера), проводимого до загрузки упаковок с РАО-1 в траншеи;
- применение относительно тонкостенного контейнера за счет создания надежного бентонитового барьера;
- эффективное использование площадей в подземном комплексе благодаря плотной укладке упаковок с РАО-1.

Скважинная концепция

Концепция с тупиковыми скважинами характеризуется минимальными изменениями в конфигурации подземных выработок. Кольцевой зазор между контейнером РАО-1 и стенкой скважины заполняется буферным материалом — песчано-бентонитовой смесью. Проходки выполняются «тупиковым» бурением «сверху-вниз» из подошвы КЗ. Эскиз данной концепции с тремя контейнерами в скважине представлен на рис. 2.

Горизонтальная концепция

Кроме траншейной и скважинной прорабатывается также горизонтальная/камерная концепция захоронения, в которой контейнеры с РАО-1 размещаются горизонтально непосредственно в КЗ [10]. За основу взята канадская концепция захоронения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) реакторов CANDU (рис. 3).

В соответствии с данной концепцией, перед размещением в ПГЗРО контейнеры с бидонами должны упаковываться в оболочку из блоков компактированного (прессованного) бентонита (БКБ). Рассматриваются два варианта их исполнения: с тремя и двумя бидонами. Использование последнего предпочтительней, т. к. проще реализовать транспортно-технологическую схему ввиду его меньших размеров. Размещение БКБ с контейнерами РАО-1 возможно в КЗ с габаритами, аналогичными траншейной концепции. В таком случае компоновка позволяет их расположить в два яруса в шахматном порядке.

Упомянутые выше концепции захоронения РАО-1 имеют свои преимущества и недостатки. Однако, прежде чем приступать к их технико-экономическому сравнению, необходимо понять, насколько каждая из них обеспечивает возможность размещения накопленного и прогнозируемого объемов РАО-1 в заданном участке массива.

Для альтернативных концепций переменным показателем является расстояние между контейнерами в траншее или КЗ, которое определяет плотность заполнения ПГЗРО. На варьируемые параметры накладываются следующие ограничения:

- промежуток между контейнерами должен давать техническую возможность сооружения ИББ (для горизонтальной и траншейной концепций);
- необходимо обеспечивать расстояние между осями соседних скважин, чтобы сохранялась техническая возможность их сооружения без риска обрушения стенок (для скважинной концепции);
- расстояние между контейнерами и скважинами следует выбирать из условия обеспечения температуры бентонита не выше 100—125 °С.

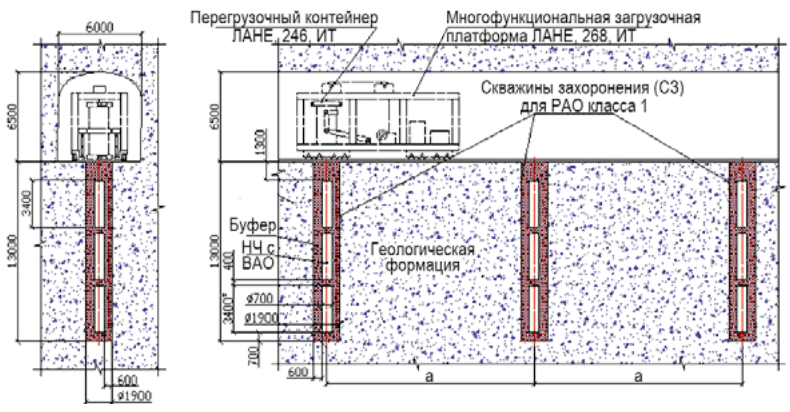

Рис. 2. Скважинная концепция. Эскиз размещения в КЗ скважин с тремя контейнерами

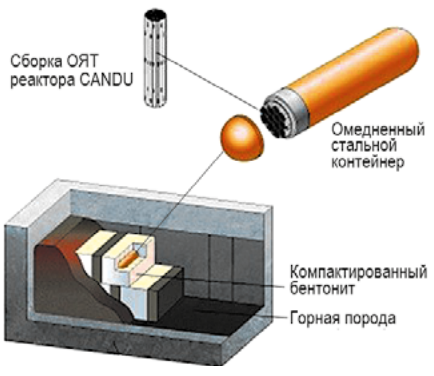

Рис. 3. Концепция размещения ОЯТ реакторов CANDU в горизонтальных выработках [11]

Предварительная оценка минимально возможного расстояния между осями контейнеров, при котором технически возможно выполнить устройство ИББ, составляет: 2 м — для траншейной концепции, 1,5 м — для горизонтальной концепции (между центрами контейнеров, расположенных в одном ярусе), 4 м — для скважинной концепции (между осями соседних скважин). Таким образом, максимальное для размещения в одной КЗ количество упаковок с РАО-1 для траншейной, горизонтальной и скважинной компоновок составит 145, 300 и 225 штук соответственно.

Если определить плотность заполнения ПГЗРО как отношение суммы объемов бидонов с РАО-1 к количеству заполненных ими КЗ, то наибольшие значения ограничиваются только конструктивными параметрами, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1. Максимальная плотность заполнения ПГЗРО

Концепция захоронения	Количество бидонов в контейнере	Максимальное количество контейнеров/ бидонов в КЗ	Максимальная плотность заполнения, $м^3$ РАО/КЗ
Траншейная	3	145/435	87
Горизонтальная	2	400/800	160
Горизонтальная	3	400/1200	240
Скважинная	3	225/675	135

Влияние тепловыделения ВАО на плотность заполнения ПГЗРО

Для обоснования возможности размещения РАО-1 в проектируемом ПГЗРО на участке «Енисейский» с применением разработанной в ИБРАЭ РАН и аттестованной в Ростехнадзоре программы для ЭВМ «Программа расчета теплового режима, напряженно-деформированного состояния и прочности пунктов захоронения радиоактивных отходов «FENIA 3D. Версия 1.0» [12] проведен расчет теплового режима ПГЗРО для каждой из рассматриваемых альтернативных концепций. Эскизы предварительных компоновочных решений и сеточное представление расчетной модели для каждой из них представлены на рис. 4—6.

В ходе вычислений варьировались расстояния между контейнерами при трех начальных

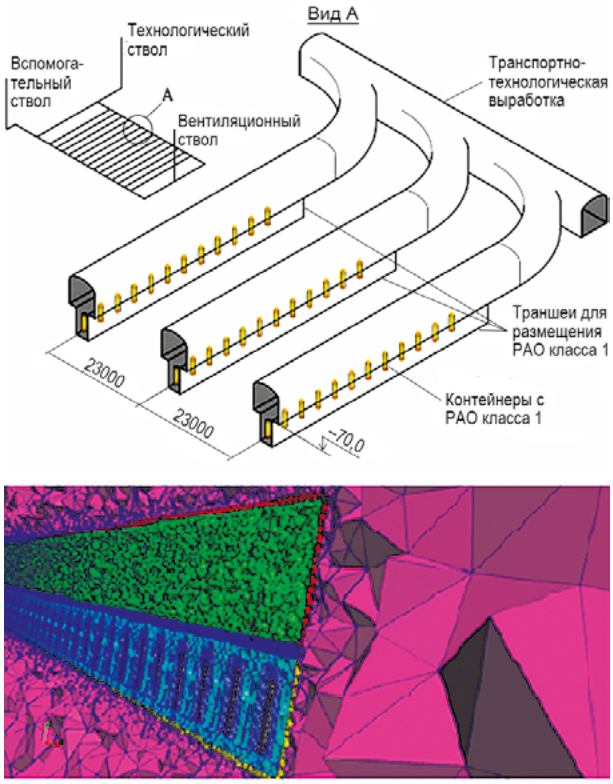

Рис. 4. Эскиз предварительной компоновки и расчетная модель при захоронении РАО-1 в траншеях

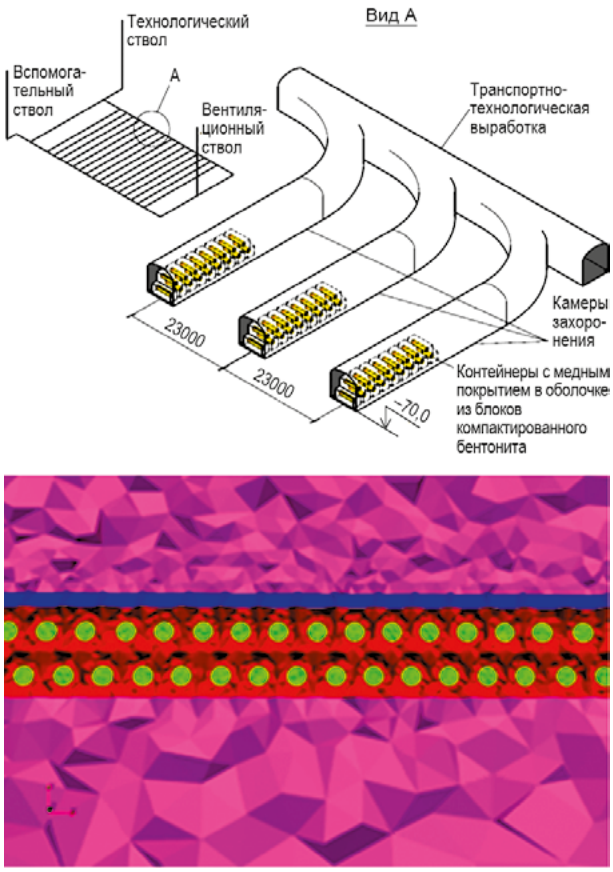

Рис. 5. Эскиз предварительной компоновки и расчетная модель при горизонтальном размещении РАО-1 в КЗ

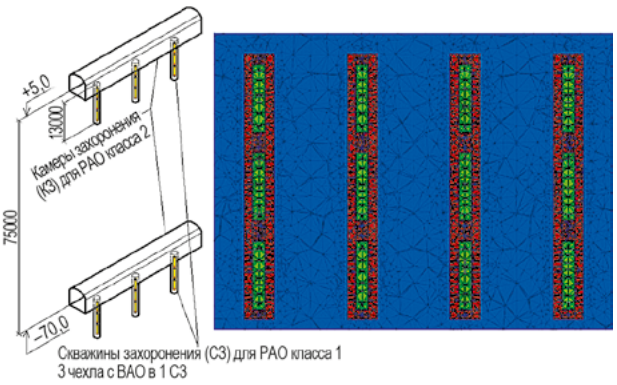

Рис. 6. Эскиз предварительной компоновки и расчетная модель при горизонтальном размещении РАО-1 в тупиковых скважинах

значениях мощности остаточного тепловыделения, которые соответствуют уровням тепловыделения РАО-1, накопленных на ПО «Маяк» (0,6 и 1 кВт/м^3), а также повышенной мощности остаточного тепловыделения 2 кВт/м^3. Расстояние между КЗ не менялось и было принято равным проектному значению — 23 м. В результате определялись области допустимых расстояний между контейнерами в КЗ, для которых температура бентонита не превышала 100—125 °С. Свойства горной породы, бентонита и стальной оболочки контейнеров принимались постоянными, независящими от температуры (табл. 2), которая на глубине расположения горизонтов ПГЗРО (порядка 500 м) считалась равной 9 °С. Для консервативной оценки полей температур предполагалось одновременное размещение контейнеров с РАО-1 в ПГЗРО.

Таблица 2. Физические свойства материалов ПГЗРО

Параметр	Горная порода	Бентонит	Сталь	РАО-1
Плотность, кг/м^3	2750	1980	7800	2500
Теплопроводность, Вт/м·К	2,61	1,2	90	2,4
Удельная теплоемкость, Дж/кг К	784	1150	450	800

Снижение мощности остаточного тепловыделения, Q, с течением времени учитывалось по аналитической зависимости, предложенной в работе [13].

Минимальные расчетные расстояния между соседними контейнерами/скважинами, при которых температура бентонита не превышает 100 °С, представлены в табл. 3.

Таблица 3. Зависимость расстояний между соседними контейнерами/скважинами от величины остаточного тепловыделения (для максимальной температуры бентонита 100 °С)

Остаточное тепловыделение, кВт/м^3	Расстояние между контейнерами/скважинами*, м			
	Траншейная концепция	Горизонтальная концепция		Скважинная концепция
		2 бидона	3 бидона	
0,6	1,5	1,3	2	3,3
1	2,0	2,4	3,5	5,7
2	4,6	5,9	15	15

* при проектном расстоянии между КЗ – 23 м

При мощности остаточного тепловыделения 0,6 кВт/м^3 размещение соседних контейнеров и скважин с РАО-1 теоретически допустимо на расстояниях, меньше предельных и обеспечивающих возможность конструктивного исполнения принятых решений. По этой причине в расчетах заполнения ПГЗРО РАО-1 с тепловыделением 0,6 кВт/м^3 минимальные промежутки между контейнерами и скважинами установлены, исходя из конструктивных ограничений, и приняты как 2 м между осями контейнеров для траншейной и горизонтальной компоновок (1,5 м — для контейнеров с двумя бидонами в горизонтальной концепции) и 4 м между осями скважин — для скважинной концепции. В остальных случаях минимально допустимые интервалы определяются результатами теплового расчета (табл. 3).

При повышенном остаточном тепловыделении (2 кВт/м^3) температура материалов ИББ возрастает, и для ее снижения (ниже 100 °С для бентонита) требуется увеличивать расстояние между контейнерами (табл. 3), что приводит к сокращению плотности заполнения ПГЗРО (табл. 4), определяемой для каждой концепции как отношение количества контейнеров в КЗ при минимально допустимом расстоянии (табл. 3) к максимальному, технически возможному количеству контейнеров (табл. 1). Определенная таким образом относительная плотность заполнения не является мерой сравнения между собой рассматриваемых концепций захоронения, но показывает чувствительность каждой из них к тепловыделению ВАО.

Особенно заметно это для горизонтальной концепции захоронения, когда относительная плотность заполнения составляет 25 % для контейнеров с двумя бидонами и менее 15 % — с тремя.

Таблица 4. Относительная плотность заполнения ПГЗРО

Остаточное тепловыделение, кВт/м^3	Относительная плотность заполнения ПГЗРО			
	Траншейная концепция	Горизонтальная концепция		Скважинная концепция
		2 бидона	3 бидона	
0,6	1	1	1	1
1	1	0,63	0,57	0,69
2	0,44	0,25	0,13	0,27

* при проектном расстоянии между КЗ — 23 м

При этом возрастает объем бентонита для заполнения пространства КЗ между соседними контейнерами. В траншейной и скважинной концепциях при повышенном тепловыделении РАО-1 относительная плотность заполнения также не превышает 45 %. Таким образом, приемлемая плотность заполнения ПГЗРО достигается при размещении в нем РАО-1 с тепловыделением не выше 1 кВт/м^3.

Расчет заполнения ПГЗРО

С учетом обоснования допустимого уровня остаточного тепловыделения РАО, при котором достигается эффективное заполнение ПГЗРО, проведена оценка количества бидонов, которые можно разместить на двух его горизонтах по трем альтернативным концепциям захоронения. В расчете РАО-1, образованные до 2010 г. (порядка 13,2 тыс. бидонов), рассматриваются с тепловыделением 0,6 кВт/м^3. Накопленный после этого срока и потенциальный объемы отходов приняты с тепловыделением 1 кВт/м^3. Результаты расчетов заполнения ПГЗРО для предельных температур бентонита 100 °С и 125 °С представлены в табл. 5.

Таблица 5. Расчет заполнения ПГЗРО накопленными РАО-1

Параметр	Траншейная концепция (3 бидона в контейнере)	Горизонтальная концепция		Скважинная концепция (3 бидона в контейнере)
		(2 бидона в контейнере)	(3 бидона в контейнере)	
Суммарное количество накопленных РАО-1 с Q=0,6 кВт/м^3	13153 бидона			
Предельная температура бентонита 100 °С				
Расстояния между контейнерами, м				
Q=0,6 кВт/м^3	2	1,5	2	4
Q=1 кВт/м^3	2	2,4	3,5	5,7
Количество контейнеров в КЗ				
Q=0,6 кВт/м^3	145	400	300	225
Контейнеры с Q=1 кВт/м^3	145	250	170	156
Количество необходимых КЗ для РАО-1 с различным тепловыделением				
Q=0,6 кВт/м^3	30,2	16,4	14,6	19,5
Q=1 кВт/м^3	29,8	43,6	45,4	40,5
ИТОГО контейнеров	8700	17466	12034	10704
ИТОГО бидонов	26100	34932	36102	32112
Предельная температура бентонита 125 °С				
Расстояния между контейнерами, м				
Q=0,6 кВт/м^3	2	1,5	1,5	4
Контейнеры с Q=1 кВт/м^3	2	1,7	2,8	4,4
Количество контейнеров в КЗ				
Q=0,6 кВт/м^3	145	400	400	225
Q=1 кВт/м^3	145	352	214	204
Количество необходимых КЗ для РАО-1 с различным тепловыделением				
Q=0,6 кВт/м^3	30,2	16,4	11	19,5
Q=1 кВт/м^3	29,8	43,6	49	40,5
ИТОГО контейнеров	8700	21909	14878	12649
ИТОГО бидонов	26100	43818	44634	37947

Расстояние между КЗ — 23 м

Из них следует, что при захоронении РАО-1 с тепловыделением не более 1 кВт/м^3 рассматриваемые альтернативные концепции позволяют разместить в ПГЗРО количество РАО-1 больше проектного (7 500 контейнеров / 22 500 бидонов). При этом траншейная и скважинная компоновки позволяют размещать в КЗ ПГЗРО также упаковки с РАО класса 2 (РАО-2), табл. 6.

Таблица 6. Характеристики заполнения ПГЗРО

Концепция	Относительное увеличение количества РАО-1 в ПГЗРО по сравнению с проектным*		Возможность размещения РАО-2
	Предельная температура бентонита 100 °С	Предельная температура бентонита 125 °С	
Траншейная	1,16	1,16	Да
Горизонтальная (2 бидона в контейнере)	1,55	1,95	Нет
Горизонтальная (3 бидона в контейнере)	1,6	1,98	Нет
Тупиковые скважины	1,43	1,67	Да

*7 500 контейнеров (22 500 бидонов с РАО-1)

Основные выводы

Результаты проведенных расчетов теплового режима ПГЗРО позволяют сделать вывод о существенном влиянии мощности остаточного тепловыделения РАО-1 на распределение температуры в материалах ИББ при начальных значениях более 1 кВт/м^3. При ее величине 2 кВт/м^3 непревышение в ПГЗРО допустимых температур 100—125 °С может быть достигнуто только за счет увеличения расстояний между упаковками с РАО-1 и, соответственно, снижения общего объема захораниваемых отходов.

Для увеличения плотности заполнения заданного участка массива горной породы необходимо снизить максимальную начальную мощность остаточного тепловыделения РАО-1 до 1 кВт/м^3. При соблюдении данного условия все альтернативные варианты захоронения обеспечат размещение проектного объема РАО-1 (22 500 бидонов). Скважинная и горизонтальная концепции характеризуются более высокой плотностью заполнения и, в случае допущения увеличения температуры бентонита до 125 °С, позволят повысить объем захораниваемых РАО-1 на 67 % и 95 % соответственно.

Литература

1. Федеральный закон от 11.07.2011 № 190-ФЗ (с изменениями на 21 декабря 2021 года) «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
2. Материалы обоснования лицензии на сооружение не относящегося к ядерным установкам пункта хранения РАО, создаваемого в соответствии с проектной документацией на строительство объектов окончательной изоляции РАО (Красноярский край, Нижне-Канский массив) в составе подземной исследовательской лаборатории (включая предварительные материалы оценки воздействия на окружающую среду). Т. 1. — М. : ФГУП «НО РАО», 2015. 108 с.
3. Установка пилотного бурения с расширением (RBR). — URL: https://www.herrenknecht.com/ru/produkte/productdetail/raise-boring-rig-rbr/ (дата обращения: 15.04.2025).
4. *Горюшкин В. В.* Технологические свойства бентонитов палеоцена Воронежской антеклизы и возможности их изменения // Вестник Воронежского университета. Геология. 2005. № 1. С. 166—177.
5. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения» (НП-093-14). В ред. приказа Ростехнадзора от 15.12.2014 № 572 (ред. от 14.12.2021) «Об утверждении федеральных норм и правил в области использования атомной энергии».
6. *Дробышевский Н. И., Моисеенко Е. В., Бутов Р. А., Токарев Ю. Н.* Трехмерное численное моделирование теплового состояния пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов в Нижнеканском массиве горных пород // Радиоактивные отходы. 2017. № 1 (1). С. 66—75.
7. *Мартынов К. В., Захарова Е. В., Кулюхин С. А.* Альтернативная концепция устройства защитных барьеров при глубинном захоронении РАО класса 1 на Енисейском участке Нижнеканского массива // Радиоактивные отходы. 2022. № 2 (19). С. 68—84. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-68-84.
8. *Бейгул В. П., Павлов Д. И.* Сравнение альтернативных схем захоронения РАО класса 1 в составе ПГЗРО // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2019. — URL: https://www.atomic-energy.ru/articles/2019/11/12/98998 (дата обращения: 15.04.2025).
9. *Бейгул В. П.* О вариантах технических решений по обращению с радиоактивными отходами

класса 1 при создании и эксплуатации ПГЗРО // Радиоактивные отходы. 2023. № 3 (24). С. 92—102. DOI: 10.25283/2587-9707- 2023-3-92-102.
10. *Богатов С. А., Дробышевский Н. И., Крупская В. В., Закусин С. В., Лехов В. А.* Предварительные оценки параметров инженерных барьеров в концепции ПГЗРО с горизонтальным размещением упаковок РАО в контейнерах с медным покрытием // Радиоактивные отходы. 2023. № 3 (24). С. 77—91. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-3-77-91.
11. *Noronha J.* Deep geological repository conceptual design report-crystalline/sedimentary rock. Nuclear Waste Management Organization, report APM-REP-00440-0015 R001, 2016.
12. Программный инструмент FENIA для расчета тепловых полей. — URL: http://www.ibrae.ac.ru/contents/444/#FENIA (дата обращения: 15.04.2025).
13. *Богатов С. А., Блохин П. А., Уткин С. С., Дорофеев А. Н., Киселёв А. И., Козлов П. В., Лукин С. А., Ремизов М. Б., Семёнов М. А.* Усредненные оценки удельной активности и тепловыделения остеклованных высокоактивных отходов, накопленных на ФГУП «ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. 2021. № 3 (103). С. 3—12.

Информация об авторах

Блохин Павел Анатольевич, кандидат технических наук, заведующий отделением, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: blokhin@ibrae.ac.ru.

Богатов Сергей Александрович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: sbg@ibrae.ac.ru.

Григорук Дмитрий Геннадьевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: gdg@ibrae.ac.ru.

Дёмин Анатолий Викторович, главный эксперт, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: demin@ibrae.ac.ru.

Дробышевский Николай Иванович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: dni@ibrae.ac.ru.

Казаков Константин Сергеевич, кандидат технических наук, заместитель заведующего лабораторией, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: kks@ibrae.ac.ru.

Кузнецов Владимир Сергеевич, программист, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: kvs@ibrae.ac.ru.

Библиографическое описание статьи

Блохин П. А., Богатов С. А., Григорук Д. Г., Дёмин А. В., Дробышевский Н. И., Казаков К. С., Кузнецов В. С. Влияние мощности остаточного тепловыделения ВАО на плотность заполнения ПГЗРО // Радиоактивные отходы. 2025. № 3 (32). С. 86—95. DOI: 10.25283/2587-9707-2025-3-86-95.

RESIDUAL HEAT RELEASE FROM HLW AND ITS IMPACT ON THE DGR'S DISPOSAL DENSITY

Blokhin P. A., Bogatov S. A., Grigoruk D. G., Demin A.V., Drobyshevsky N. I., Kazakov K. S., Kuznetsov V. S.

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Article received on July 23, 2025

The article presents the calculated possible volume of heat-generating radioactive waste that can be disposed of in a deep disposal facility assuming that the temperature in the bentonite buffer material would not exceed 100 and 125 °C FENIA 3D. Version 1.0, i. e., "Software for thermal mode, stress-strain state and strength calculations in radioactive waste disposal facilities" developed by the Nuclear Safety Institute of RAS and certified by Rostekhnadzor was used to perform the calculations. The paper considers three emplacement options for vitrified high-level waste packages with heat release of 0.6; 1.0 and 2.0 kW/m^3.

Keywords: *radioactive waste, deep disposal facility, engineered safety barriers, residual heat.*

References

1. *Federal Law of July 11, 2011 No. 190-FZ (as amended on December 21, 2021) "Ob obrashchenii s radioaktivnymi otkhodami i o vnesenii izmeneniy v otdel'nyye zakonodatel'nyye akty Rossiyskoy Federatsii"* [On Radioactive Waste Management and Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation].

2. *Materialy obosnovaniya litsenzii na sooruzheniye ne otnosyashchegosya k yadernym ustanovkam punkta khraneniya RAO, sozdavayemogo v sootvetstvii s proyektnoy dokumentatsiyey na stroitel'stvo ob"yektov okonchatel'noy izolyatsii RAO (Krasnoyarskiy kray, Nizhne-Kanskiy massiv) v sostave podzemnoy issledovatel'skoy laboratorii (vklyuchaya predvaritel'nyye materialy otsenki vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu)* [Materials supporting construction license application for a non-nuclear waste storage facility developed in accordance with the design documentation for the construction of final waste disposal facilities (Krasnoyarsk Territory, Nizhne-Kanskiy Massif) as part of an underground research laboratory (including preliminary environmental impact assessment)]. Vol. 1. Moscow, FSUE NO RAO Publ., 2015. 108 p.

3. *Ustanovka pilotnogo bureniya s rasshireniyem (RBR)* [Rig for pilot boring with expansion (RBR)]. — URL: https://www.herrenknecht.com/ru/produkte/productdetail/raise-boring-rig-rbr/ (accessed on: 15.04.2025).

4. Goryushkin V. V. Tekhnologicheskiye svoystva bentonitov paleotsena Voronezhskoy anteklizy i vozmozhnosti ikh izmeneniya [Paleocene bentonites of the Voronezh anteclise: performance characteristics and the potential for their alteration]. *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya — Bulletin of the Voronezh University. Geology,* 2005, no. 1, pp. 166—177.

5. *Federal'nyye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii "Kriterii priyemlemosti radioaktivnykh otkhodov dlya zakhoroneniya"* [Federal norms and rules in the field of atomic energy use. Radioactive waste acceptance criteria for disposal] (NP-093-14). As amended by the order of Rostekhnadzor of December 15, 2014 N 572 (as amended on December 14, 2021) "Ob utverzhdenii federal'nykh norm i pravil v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii" [On the approved federal norms and rules in the field of atomic energy use].

6. Drobyshevsky N. I., Moiseenko E. V., Butov R. A., Tokarev Yu. N. Trekhmernoye chislennoye modelirovaniye teplovogo sostoyaniya punkta glubinnogo zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov v Nizhnekanskom massive gornykh porod [Three-dimensional numerical modelling of the thermal state of the deep radioactive waste disposal facility in the Nizhnekansk granitoid massif]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste,* 2017, no. 1, pp. 64—73.

7. Martynov K. V., Zakharova E. V., Kulyukhin S. A. Al'ternativnaya kontseptsiya ustroystva zashchitnykh bar'yerov pri glubinnom zakhoronenii RAO klassa 1 na Yeniseyskom uchastke Nizhnekanskogo massiva [Alternative Conceptual Designs of Safety Barriers Proposed for Deep RW Class 1 Disposal at the Yeniseiskiy Site in the Nizhnekanskiy Rock Mass] *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste,* 2022, no. 2 (19), pp. 68—84. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-68-84.

8. Beygul V. P., Pavlov D. I. Sravneniye al'ternativnykh skhem zakhoroneniya RAO klassa 1 v sostave PGZRO

[Comparison of alternative disposal layouts for radioactive waste Class 1 as part of the DGR]. *Bezopasnost' yadernykh tekhnologiy i okruzhayushchey sredy — Safety of nuclear technologies and the environment,* 2019. URL: https://www.atomic-energy.ru/articles/2019/11/12/98998 (accessed on: 15.04.2025).

9. Beygul V. P. O variantakh tekhnicheskikh resheniy po obrashcheniyu s radioaktivnymi otkhodami klassa 1 pri sozdanii i ekspluatatsii PGZRO [On Design Options Providing the Management of Radioactive Waste Class 1 during DGR Establishment and Operation]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste,* 2023, no. 3 (24), pp. 92—102. DOI: 10.25283/2587-9707- 2023-3-92-102.

10. Bogatov S. A., Drobyshevsky N. I., Krupskaya V. V., Zakusin S. V., Lekhov V. A. Predvaritel'nyye otsenki parametrov inzhenernykh bar'yerov v kontseptsii PGZRO s gorizontal'nym razmeshcheniyem upakovok RAO v konteynerakh s mednym pokrytiyem [Preliminary Assessment of Engineered Barrier Parameters under DGR Concept with Horizontal Orientation of RW Packages in Copper Coated Containers]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste,* 2023, no. 3 (24), pp. 77—91. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-3-77-91.

11. Noronha J. Deep geological repository conceptual design report-crystalline/sedimentary rock. Nuclear Waste Management Organization, report APM-REP-00440-0015 R001, 2016.

12. *Programmnyy instrument FENIA dlya rascheta teplovykh poley* [FENIA software tool for thermal field calculations]. — URL: http://www.ibrae.ac.ru/contents/444/#FENIA (accessed on: 15.04.2025).

13. Bogatov S. A., Blokhin P. A., Utkin S. S., Dorofeev A. N., Kiselev A. I., Kozlov P. V., Lukin S. A., Remizov M. B., Semenov M. A. Usrednonnyye otsenki udel'noy aktivnosti i teplovydeleniya osteklovannykh vysokoaktivnykh otkhodov, nakoplennykh na FGUP "PO "Mayak" [Averaged estimated specific activity and heat release of vitrified high-level waste accumulated at the Mayak PA]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation Safety Issues,* 2021, no. 3 (103), pp. 3—12.

Information about the author

Blokhin Pavel Anatolyevich, PhD in Technical Sciences, Head of the Department, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: blokhin@ibrae.ac.ru.

Bogatov Sergey Alexandrovich, PhD in Physics and Mathematics, Leading Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: sbg@ibrae.ac.ru.

Grigoruk Dmitry Gennadievich, PhD in Physics and Mathematics Research Fellow, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: gdg@ibrae.ac.ru.

Demin Anatoly Viktorovich, Chief Expert, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: demin@ibrae.ac.ru.

Drobyshevsky Nikolai Ivanovich, PhD in Physics and Mathematics Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: dni@ibrae.ac.ru.

Kazakov Konstantin Sergeevich, PhD in Technical Sciences, Deputy Head of the Laboratory, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: kks@ibrae.ac.ru.

Kuznetsov Vladimir Sergeevich, programmer, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: kvs@ibrae.ac.ru.

Bibliographic description

Blokhin P. A., Bogatov S. A., Grigoruk D. G., Demin A.V., Drobyshevsky N. I., Kazakov K. S., Kuznetsov V. S. Residual heat release from HLW and its impact on the DGR's disposal density. *Radioactive Waste,* 2025, no. 3 (32), pp. 86—95. DOI: 10.25283/2587-9707-2025-3-86-95. (In Russian).